

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation <sup>6</sup> : <b>G21K 1/06</b>		A1	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: <b>WO 99/57732</b>
		(43) Internationales Veröffentlichungsdatum:	11. November 1999 (11.11.99)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/02999 (22) Internationales Anmeldedatum: 4. Mai 1999 (04.05.99)  (30) Prioritätsdaten: 198 19 898.1      5. Mai 1998 (05.05.98)      DE 199 03 807.4      2. Februar 1999 (02.02.99)      DE 299 02 108.4      8. Februar 1999 (08.02.99)      DE  (71) Anmelder (nur für AT BE CH CY DE DK ES FI FR GR IT LU MC NL PT SE): CARL ZEISS [DE/DE]; D-89518 Heidenheim (DE).  (71) Anmelder (nur für GB IE JP KR): CARL-ZEISS-STIFTUNG trading as CARL ZEISS [DE/DE]; D-89518 Heidenheim (DE).  (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHULTZ, Jörg [DE/DE]; Bohlstrasse 29, D-73430 Aalen (DE). WANGLER, Jo- hannes [DE/DE]; An der Reute 15, D-89551 Königsbronn (DE).  (74) Anwalt: WEITZEL & PARTNER; Friedenstrasse 10, D-89522 Heidenheim (DE).		(81) Bestimmungsstaaten: JP, KR, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).  Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i> <i>Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen</i> <i>Frist; Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen</i> <i>eintreffen.</i>	
(54) Title: LIGHTING SYSTEM, ESPECIALLY FOR EXTREME ULTRAVIOLET LITHOGRAPHY			
(54) Bezeichnung: BELEUCHTUNGSSYSTEM INSBESONDERE FÜR DIE EUV-LITHOGRAPHIE			
(57) Abstract			
<p>The invention relates to a lighting system for wavelengths <math>\leq 193</math> nm, especially for extreme ultraviolet lithography, comprising: at least one light source which provides an illumination A on a surface; at least one device for creating secondary light sources; at least one mirror or lens device comprising at least one mirror or lens which is divided into a grid elements; one or more optical elements which are positioned between the mirror or lens device comprising at least one mirror or lens divided into grid elements and the reticle plane, whereby the optical elements represent the secondary light source in the exit pupil of the lighting system. The invention is characterized in that the light source is a light source for generating radiation at a wavelength <math>\leq 193</math> nm which emits a radiation in a marked plane in a wavelength spectrum. The wavelength range used for the application, especially for lithography, has a beam divergence perpendicular to said plane which is less than 5 mrad.</p>			

### (57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem für Wellenlängen  $\leq 193$  nm, insbesondere für die EUV-Lithographie mit mindestens einer Lichtquelle, die in einer Fläche eine Ausleuchtung A aufweist; mindestens einer Einrichtung zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen; mindestens einer Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend mindestens einen Spiegel oder eine Linse, der bzw. die in Rasterelemente gegliedert ist; ein oder mehrere optische Elemente, die zwischen der Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend mindestens einen Spiegel oder eine Linse, der bzw. die in Rasterelemente gegliedert ist, und der Retikelebene angeordnet sind, wobei die optischen Elemente die sekundäre Lichtquelle in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems abbilden. Das Beleuchtungssystem ist dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle eine Lichtquelle zur Erzeugung von Strahlung mit einer Wellenlänge  $\leq 193$  nm ist, die in eine ausgezeichnete Ebene mit einem Wellenlängenspektrum abstrahlt, wobei der für die Anwendung, insbesondere für die Lithographie verwendete Wellenlängenbereich, eine Strahldivergenz senkrecht zu dieser Ebene aufweist, die kleiner als 5 mrad ist.

### LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshjan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

### Beleuchtungssystem insbesondere für die EUV-Lithographie

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem gemäß dem Oberbegriff des Anspruches 1 sowie eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen  
5 Beleuchtungssystem und ein Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer Bauelemente mit einer Projektionsbelichtungsanlage.

Um die Strukturbreiten für elektronische Bauteile noch weiter reduzieren zu können, insbesondere in dem Submikron-Bereich, ist es erforderlich, die  
10 Wellenlänge des für die Mikrolithographie eingesetzten Lichtes zu verringern. Denkbar ist bei Wellenlängen kleiner als 193 nm beispielsweise die Lithographie mit weichen Röntgenstrahlen, sog. EUV-Lithographie.

Ein für die EUV-Lithographie geeignetes Beleuchtungssystem soll mit  
15 möglichst wenigen Reflektionen das für die EUV-Lithographie vorgegebene Feld, insbesondere das Ringfeld eines Objektivs homogen, d.h. uniform ausleuchten, des weiteren soll die Pupille des Objektivs feldunabhängig bis zu einem bestimmten Füllgrad  $\sigma$  ausgeleuchtet werden und die Austrittspupille des Beleuchtungssystems in der Eintrittspupille des Objektivs  
20 liegen.

Aus der US 5,339,246 ist ein Beleuchtungssystem für eine  
Lithographieeinrichtung, die EUV-Strahlen verwendet, bekanntgeworden. Zur gleichmäßigen Beleuchtung in der Retikelebene und Füllung der Pupille  
25 schlägt die US 5,339,246 einen Kondensor vor, der als Kollektorlinse aufgebaut ist und wenigstens vier paarweise Spiegelfacetten, die symmetrisch angeordnet sind, umfaßt. Als Lichtquelle wird eine Plasma-Lichtquelle verwendet.

In der US 5,737,137 ist ein Beleuchtungssystem mit einer Plasma-Lichtquelle umfassend einen Kondensorspiegel, gezeigt, bei dem mit Hilfe von

sphärischen Spiegeln eine Ausleuchtung einer zu beleuchtenden Maske bzw. eines Retikels erzielt wird.

Die US 5,361,292 zeigt ein Beleuchtungssystem, bei dem eine Plasma-  
5 Lichtquelle vorgesehen ist und die punktförmige Plasma-Lichtquelle mit Hilfe eines Kondensors, der mindestens drei asphärische, außermittig angeordnete Spiegel aufweist, in eine ringförmig ausgeleuchtete Fläche abgebildet wird. Mit Hilfe einer speziellen nachgeordneten Abfolge von grazing-incidence-  
10 Spiegeln wird die ringförmig ausgeleuchtete Fläche dann in die Eintrittspupille abgebildet.

Aus der US 5,581,605 ist ein Beleuchtungssystem bekanntgeworden, bei dem ein Photonenstrahler mit Hilfe eines Wabenkondensors in eine Vielzahl von  
15 sekundären Lichtquellen aufgespalten wird. Hierdurch wird eine gleichmäßige bzw. uniforme Ausleuchtung in der Retikelebene erreicht. Die Abbildung des Retikels auf den zu belichtenden Wafer erfolgt mit Hilfe einer herkömmlichen Reduktionsoptik. Im Beleuchtungsstrahlengang ist genau ein gerasterter Spiegel mit gleich gekrümmten Elementen vorgesehen.

Die US 5,677,939 zeigt ein Beleuchtungssystem für EUV-  
20 Beleuchtungsanlagen, bei dem ein Ringfeld homogen ausgeleuchtet wird. Beim EUV-Beleuchtungssystem gemäß der US 5,677,939 werden die von der EUV-Quelle emittierten Strahlen zu einem parallelen Strahlenbüschel geformt, beispielsweise mit Hilfe eines Spiegels. Zur Ausbildung einer Vielzahl von  
25 sekundären Lichtquellen wird das parallele Strahlenbüschel auf einen Spiegel mit einer Vielzahl von Zylinderwaben geführt. Die US-A-5677939 beschreibt auch die Verwendung von Synchrotron-Strahlungsquellen, allerdings wird wegen der Parallelität der austretenden Synchronstrahlung diese direkt auf den Spiegel mit Zylinderwaben geführt, ohne Zwischenschaltung von  
30 optischen Elementen. Sämtliche Ausführungsbeispiele der US 5,677,939 arbeiten im parallelen Strahlengang. Zudem umfassen die aus der

US 5,677,939 bekannten Facettenspiegel Facetten mit optischer Wirkung und sind auf einem Plansubstrat angeordnet.

Aus der US 5,512,759 ist ein Beleuchtungssystem für ein Ringfeld-  
5 Projektionssystem mit einer Synchrotron-Strahlungsquelle bekanntgeworden, das ein Kondensorsystem mit einer Vielzahl von Sammelspiegeln umfaßt, die die von der Synchrotron-Strahlungsquelle abgegebene Strahlung sammeln, zu einem ringförmigen Lichtstrahl formen, der mit dem ringförmig  
10 auszuleuchtenden Feld korrespondiert. Hierdurch wird das ringförmige Feld sehr gleichmäßig ausgeleuchtet. Die Synchrotron-Strahlungsquelle weist in der Abstrahlebene eine Strahldivergenz  $> 100$  mrad auf.

Die US 5,439,781 zeigt ein Beleuchtungssystem mit einer Synchrotron-Strahlungsquelle, bei der der Lichtleitwert, d. h. die Lagrange optische  
15 Invariante mit Hilfe einer Streuscheibe in der Eintrittspupille des Objektives eingestellt wird, wobei die Streuscheibe eine Vielzahl von pyramidalen Strukturen aufweisen kann. Auch bei der US 5,439,781 weist die Synchrotron-Strahlungsquelle eine Strahldivergenz  $> 100$  mrad auf. Der Kollektor-Spiegel zum Sammeln der Synchrotron-Strahlung und Bündeln derselben kann  
20 facettiert ausgebildet sein.

Der Offenbarungsgehalt sämtlicher zuvor genannten Schriften

US 5,339,246

25 US 5,737,137

US 5,361,292

US 5,581,605

US 5,677,939

US 5,512,759

30 US 5,439,781

wird in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich aufgenommen.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein möglichst einfach aufgebautes Beleuchtungssystem und ein Verfahren zum Design eines solchen anzugeben, mit dem die Anforderungen an ein Belichtungssystem für Wellenlängen  $\leq 193$  nm, insbesondere im EUV-Bereich erfüllt werden können. Insbesondere sollen neben einer uniformen Ausleuchtung des Retikels auch die Telezentrieanforderungen eines System für Wellenlängen  $\leq 193$  nm erfüllt werden.

Unter Telezentrie wird in der vorliegenden Anmeldung verstanden, daß das Gesamtsystem am Wafer telezentrisch ist. Dies erfordert eine Anpassung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems an die Eintrittspupille des Objektives, die für ein reflektives Retikel im Endlichen liegen.

In der vorliegenden Anmeldung ist die Telezentrieanforderung dann erfüllt, wenn die Abweichung der Schwerstrahlen von Beleuchtung und Objektiv in der Retikelebene ein bestimmtes Maß, beispielsweise  $\pm 4,0$  mrad, vorzugsweise  $\pm 1,0$  mrad nicht überschreitet und die Schwerstrahlen telezentrisch auf den Wafer treffen.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß bei einem oberbegrifflichen Beleuchtungssystem die Lichtquelle eine Lichtquelle zur Erzeugung von Strahlung mit einer Wellenlänge  $\leq 193$  nm ist, die in eine ausgezeichnete Ebene mit einem Wellenlängenspektrum abstrahlt, wobei der für die Anwendung, insbesondere die Lithographie verwendbare Wellenlängenbereich eine Strahldivergenz senkrecht zu dieser Ebene aufweist, die kleiner als 5 mrad ist.

Im EUV-Bereich finden als bevorzugte Lichtquellen mit einer Strahldivergenz kleiner als 5 mrad in der Ebene senkrecht zur ausgezeichneten Ebene

Synchrotronstrahlungsquellen Verwendung. Synchronstrahlung wird emittiert, wenn relativistische Elektronen in einem Magnetfeld abgelenkt werden. Die Synchrotron-Strahlung wird tangential zur Elektronenbahn emittiert.

5 Bei Synchrotronstrahlungsquellen kann man derzeit drei Arten von Quellen unterscheiden:

- Bending-Magneten
- Wiggler
- Undulatoren

10

Bei Bending-Magnet-Quellen werden die Elektronen durch einen Bending-Magneten abgelenkt und Photonen-Strahlung emittiert.

15

Wiggler-Quellen umfassen zur Ablenkung des Elektrons bzw. eines Elektronenstrahles einen sogenannten Wiggler, der eine Vielzahl von aneinandergereihten abwechselnd gepolten Magnetpaaren umfaßt. Durchläuft ein Elektron einen Wiggler, so wird das Elektron einem periodischen, vertikalen Magnetfeld ausgesetzt; das Elektron oszilliert dementsprechend in der horizontalen Ebene. Wiggler zeichnen sich weiter dadurch aus, daß keine Kohärenzeffekte auftreten. Die mittels eines Wigglers erzeugte Synchrotronstrahlung ähnelt der eines Bending-Magneten und strahlt in einen horizontalen Raumwinkel ab. Sie weist im Gegensatz zum Bending-Magneten einen um die Anzahl der Pole des Wigglers verstärkten Fluß auf.

20

25 Der Übergang von Wiggler-Quellen zu Undulator-Quellen ist fließend.

30

Bei Undulator-Quellen werden die Elektronen im Undulator einem Magnetfeld mit kürzerer Periode und geringerem Magnetfeld der Ablenkpole als beim Wiggler ausgesetzt, so daß Interferenz-Effekte der Synchrotronstrahlung auftreten. Die Synchrotronstrahlung weist aufgrund der Interferenzeffekte ein

diskontinuierliches Spektrum auf und strahlt sowohl horizontal wie vertikal in ein kleines Raumwinkелеlement ab; d.h. die Strahlung ist stark gerichtet.

Sämtliche zuvor beschriebenen Synchrotron-EUV-Strahlungsquellen stellen bei geeigneter Dimensionierung EUV-Strahlung beispielsweise von 13 bzw. 11 nm mit ausreichender Leistung für die EUV-Lithographie zur Verfügung.

Betreffend Synchrotron-Strahlung wird auf Ernst Eckhart Koch, "Handbook of Synchrotron Radiation", 1983, Elsevier-Science, New York, verwiesen, wobei der Offenbarungsgehalt dieser Schrift in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich mitaufgenommen wird.

Da sich die erfindungsgemäßen Strahlungsquellen zumindest in einer Ebene durch eine Strahldivergenz, die kleiner als 5 mrad ist, auszeichnen, sind mit Vorteil Mittel zur Strahlaufweitung beispielsweise ein Kollektorsystem vorgesehen.

Als Strahlaufweitungsmittel können in einer vorteilhaften Ausführungsform Zerstreuspiegel oder Scanspiegel, die eine vorbestimmte Bewegung zur Ausleuchtung einer Fläche durchführen, vorgesehen sein.

Da Feld und Apertur der Lichtquelle nicht ausreichen, um Feld und Apertur in der Retikelebene zu füllen bzw. zu beleuchten, umfaßt das erfindungsgemäße Beleuchtungssystem mindestens einen Spiegel oder eine Linse mit Rasterelementen zur Erzeugung einer Vielzahl von sekundären Lichtquellen, die in der Blendenebene gleichmäßig verteilt sind. Da die geometrische Ausdehnung der Rasterelemente des ersten Spiegels oder der ersten Linse die Form des ausgeleuchteten Feldes in der Retikelebene bestimmt, werden die Feldwaben bei einem ringförmigen Scan-Schlitz bevorzugt rechteckig ausgebildet. Die optische Wirkung der Rasterelemente des ersten Spiegels, die auch als Feldwaben bezeichnet werden, ist so ausgelegt, daß in der



Blendenebene ein Bild der Lichtquelle entsteht, eine sogenannte sekundäre Lichtquelle. Ist die Ausdehnung der Lichtquelle gering, beispielsweise näherungsweise punktförmig, wie bei einer Undulator-Quelle, so ist auch die Ausdehnung der sekundären Lichtquelle gering, und alle Lichtstrahlen laufen  
5 nahezu durch einen Punkt. In jeder Ebene nach der Blendenebene entsteht dann ein Bild der Feldwabe, wobei der Abbildungsmaßstab durch das Verhältnis von Abstand Blende-Retikel zu Feldwabe-Blende gegeben ist. Die Feldwaben sind dabei so gekippt, daß sich die Bilder der Feldwaben in der Retikelebene zumindest zum Teil überlagern.

10 Die Abbildung der sekundären Lichtquellen in die Eintrittspupille des Objektivs geschieht vorteilhafterweise mit einem Feldspiegel bzw. einer Feldlinse, wobei die Feldlinse bzw. der Feldspiegel das Ringfeld durch Steuerung der Verzeichnung formt. Der Abbildungsmaßstab der Feldwabenabbildung wird  
15 dadurch nicht verändert.

Bei ausgedehnten Lichtquellen, wie beispielsweise einem Bending-Magneten, sind die sekundären Lichtquellen ausgedehnt, so daß das Bild der Feldwaben in der Retikelebene zerläuft. Ein scharfes Bild bei einem solchen System kann  
20 erreicht werden, wenn man einen zweiten Spiegel oder eine Linse mit Rasterelementen, d.h. eine sogenannte Doppelfacettierung, versieht, wobei die Rasterelemente des zweiten Spiegels oder der Linse, die sogenannten Pupillenwaben, am Ort der sekundären Lichtquellen, sitzen.

25 Bei Systemen mit zwei Spiegeln mit Rasterelementen ist die Form der Rasterelemente des zweiten Spiegels, d.h. der Pupillenwaben, an die Form der sekundären Lichtquellen angepaßt und somit verschieden von der Form der ersten Rasterelemente, d.h. der Feldwaben. Besonders bevorzugt sind die Pupillenwaben rund, wenn auch die Lichtquelle rund ausgebildet ist.

Besonders bevorzugt ist es, wenn der erste Spiegel mit Rasterelementen rotationssymmetrisch bzw. rund ausgeleuchtet wird, da dann mit entsprechender Anordnung in der Blendenebene eine gleichmäßige Verteilung der sekundären Lichtquellen erreicht werden kann.

5

Ist die Ausleuchtung des ersten Spiegels hiervon abweichend, beispielsweise rechteckig, so wird bei einem derartigen System mit einer Doppelfacettierung die gewünschte runde Ausleuchtung der Eintrittspupille des Objektivs erreicht.

10

Die den Spiegeln mit Rasterelementen nachgeordneten optischen Elemente dienen dazu, die Blendenebene des Beleuchtungssystems in die Eintrittspupille des Projektionsobjektivs abzubilden, das Ringfeld zu formen. Des weiteren dienen sie dazu, die Beleuchtungsverteilung entsprechend den Anforderungen des Belichtungsprozesses zu erzeugen.

15

Besonders bevorzugt ist es, wenn die optischen Elemente grazing-incidence-Spiegel mit Inzidenzwinkel  $\leq 20^\circ$  umfassen. Um die mit jeder Reflektion verbundenen Lichtverluste zu minimieren, ist mit Vorteil vorgesehen, wenn die Anzahl der Feldspiegel gering gehalten wird. Besonders bevorzugt sind Ausführungsformen mit höchstens zwei Feldspiegeln.

20

Nachfolgend soll ein Zahlenbeispiel gegeben werden, aus dem die Notwendigkeit der Lichtleitwerterhöhung beispielhaft für den Fall einer Undulator-Quelle zu ersehen ist.

25

Fordert man eine Apertur in der Waferebene von  $NA_{\text{Wafer}} = 0.1-0.25$ , so bedeutet dies bei 4:1 Systemen eine Apertur in der Retikelebene von  $NA_{\text{Retikel}} = 0.025-0.0625$ . Soll das Beleuchtungssystem diese Apertur bis zu einem Füllgrad von  $\sigma = 0.6$  homogen und feldunabhängig ausleuchten, so muß die

30

EUV-Quelle über folgenden 2-dim-Lichtleitwert (LLW), d. h. Lagrange optische Invariante oder Etendu verfügen:

$$LLW_{\text{Bel.}} = \sigma^2 \quad LLW_{\text{Obj}} = 0.149 \text{ mm}^2 - 0.928 \text{ mm}^2$$

5

verfügen. Der Lichtleitwert LLW, d. h. die Lagrange optische Invariante, ist wie folgt allgemein definiert:

$$LLW = x \cdot y \cdot NA^2 = A \cdot NA^2, \text{ wobei } A \text{ die ausgeleuchtete Fläche ist.}$$

10

A beträgt in der Retikelebene z.B. 110 mm x 6 mm.

Als Lichtquelle für das erfindungsgemäße EUV-Beleuchtungssystem sei in einer ersten Ausführungsform eine Undulator-Quelle betrachtet.

15

Der Lichtleitwert, d. h. die Langrange optische Invariante oder Etendu, für die Undulator-Quelle läßt sich nach einem vereinfachten Modell bei Annahme eines homogenen Flächenstrahlers mit Durchmesser

$$\varnothing = 1.0 \text{ mm und Apertur } NA_{\text{Und}} = 0.001 \text{ mit}$$

$$LLW = A \cdot NA^2$$

20

$$A_{\text{Und}} = \pi \cdot (\varnothing / 2)^2$$

$$= 0.785 \text{ mm}^2$$

$$NA_{\text{Und}} = 0.001$$

zu

$$LLW_{\text{Und}} = A \cdot NA^2 = 0.00000079 \text{ mm}^2 = 7.9 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2 \text{ abschätzen. Wie aus}$$

25

dieser groben Abschätzung zu ersehen, ist der Lichtleitwert der Undulator-Quelle im Vergleich zum geforderten Lichtleitwert verschwindend klein.

Der Lichtleitwert, d. h. die Lagrange optische Invariante, kann durch die Erzeugung von sekundären Lichtquellen, die verteilt angeordnet sind, auf das erforderliche Maß in der Eintrittspupille des Objektives erhöht werden. Hierfür

30

wird der erste Spiegel mit Rasterelementen ausgeführt. Die Ausleuchtung der Eintrittspupille eines Objektives wird durch den Füllfaktor definiert. Es gilt:

$$\text{Füllfaktor: } \sigma = \frac{r_{\text{Beleuchtung}}}{R_{\text{Objektivapertur}}},$$

wobei  $R_{\text{Objektivapertur}}$ : Radius Eintrittspupille des Objektives ist  
 $r_{\text{Beleuchtung}}$ : Radius der Ausleuchtung der Feldwabenplatte bei annularer Ausleuchtung

Bei  $\sigma = 1.0$  ist die Eintrittspupille vollständig gefüllt;  $\sigma = 0.6$  entspricht einer Unterfüllung.

Da aufgrund des kleinen Lichtleitwertes der Undulator-Quelle die Teilpupillen scharfe Intensitäts-Peaks sind, ist es vorteilhaft, wenn diese mit Hilfe von "wobbelnden" Feldspiegel verschmiert werden, wobei die Feldausleuchtung dabei unberührt bleiben sollte. Deshalb ist es vorteilhaft, den wobbelnden Feldspiegel so dicht wie möglich an der Retikelebene anzubringen.

Nachfolgend soll eine Abschätzung für den zu variierenden Winkelbereich des wobbelnden Feldspiegels bzw. periodisch sich bewegenden Feldspiegels gegeben werden: Nimmt man für die Apertur in der Retikelebene  $NA_{\text{Ret}} = 0,025$  an und beträgt der Abstand der Teilpupillen aufgrund der Parzellierung bei  $\Delta NA \approx 0,005$ , so sollte der variierende Winkelbereich in der Größenordnung  $\approx \pm 2,5$  mrad liegen. Ein Beispiel für einen wobbelnden Feldspiegel wäre ein Toroidspiegel mit einer Größe von 160 x 170 mm sowie einem lokalen dynamischen Gradienten von  $\pm 2$  mrad in x- und y-Richtung bei der Stabilität von  $\pm 0.1$  mrad.

Ein Verschmieren kann nicht nur mit Hilfe von beweglichen sogenannten wobbelnden Feldspiegeln, sondern auch durch dynamisches Verformen der Spiegeloberfläche erreicht werden.

- 5 Um eine hohe Scan-Uniformity zu erzielen, kann mit Vorteil die Verwendung von aktiven Linsen oder Spiegeln für die optischen Elemente vorgesehen sein.

- 10 Da die Fertigung von Feldwaben mit einem hohen Aspektverhältnis von beispielsweise 20 : 1 schwierig ist, kann mit Vorteil vorgesehen sein, zur Reduzierung des Aspektverhältnisses der Feldwaben diese astigmatisch auszubilden. Dabei werden die sekundären Lichtquellen in tangentiale und sagittale sekundäre Lichtquellen aufgespalten, die sich in der tangentialen und sagittalen Blendenebene befinden.

- 15 Während das System bei Wellenlängen im EUV-Bereich, wie zuvor beschrieben, rein reflektiv, d.h. ausschließlich mit Spiegelkomponenten designt ist, ist eine Verwendung auch bei 193 nm bzw. 157 nm-System denkbar. In einem solchen Fall kommen refraktive Komponenten wie Linsen  
20 zum Einsatz.

- Die hierin beschriebenen Systeme sind insbesondere deswegen für 193 nm bzw. 157 nm-Systeme von Interesse, weil sie mit wenigen optischen Komponenten auskommen und die optischen Elemente bei diesen  
25 Wellenlängen hohe Absorptionen aufweisen.

Vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

- 30 Nachfolgend soll die Erfindung anhand der Zeichnungen beispielhaft beschrieben werden.

Es zeigen:

- Fig. 1: Prinzipskizze des Strahlengangs eines Systems mit zwei Wabenplatten;
- 5 Fig. 2A, 2B: Feld- und Pupillen-Abbildung für das zentrale Wabenpaar;
- Fig. 3: Verlauf der Lichtstrahlen für eine Rechteckfeldwabe in Kombination mit einer Rechteckpupillenwabe;
- Fig. 4: Verlauf gemäß Fig. 3 mit in den Strahlverlauf eingebrachter Feldlinse;
- 10 Fig. 5: Verlauf gemäß Fig. 3 mit zwei in den Strahlverlauf eingebrachten Feldlinsen;
- Fig. 6: Prinzipskizze für ein refraktives System mit Feld- und Pupillenwaben;
- Fig. 7-14: unterschiedliche Anordnungen von Feldwaben auf einer Feldwabenplatte;
- 15 Fig. 15-17: Gitter von sekundären Lichtquellen in der Eintrittspupille des Objektives;
- Fig. 18-20: Zusammenhang zwischen ausgeleuchteten Flächen von Pupillenwabenplatte und Feldwabenplatte sowie Baulänge und Apertur in der Retikelebene;
- 20 Fig. 21A-21B: eine erste Ausführungsform eines Beleuchtungssystems mit Undulator-Lichtquelle (Typ A) in refraktiver Darstellung;
- Fig. 22A-22B: eine zweite Ausführungsform eines Beleuchtungssystems mit Undulator-Lichtquelle (Typ B) in refraktiver Darstellung;
- 25 Fig. 23A-23B: eine dritte Ausführungsform eines Beleuchtungssystems mit Undulator-Lichtquelle (Typ C) in refraktiver Darstellung;
- Figur 24: prinzipielle Anordnung eines Typ A-Beleuchtungssystems in reflektiver Darstellung;
- Figur 25: Anordnung der Rasterelemente auf dem facettierten ersten Spiegel;
- 30 Fig. 26 - 29: eine Ausgestaltung eines Typ-A-Beleuchtungssystems;

- Fig. 30 - 33: Ausleuchtung, Intensitätsverlauf, Scanenergie und Pupillenausleuchtung eines Systems gemäß der Figuren 26 bis 29;
- Fig. 34 - 37: eine Ausgestaltung eines Typ-B-Beleuchtungssystems;
- 5 Fig. 38 - 41: Ausleuchtung, Intensitätsverlauf, Scan-Energie und Pupillenausleuchtung eines Systems gemäß Figuren 34 bis 37;
- Fig. 42 - 43: prinzipielle Anordnung eines Typ C1-Beleuchtungssystems in reflektiver Darstellung;
- Figur 44: prinzipielle Anordnung eines Typ C2-Beleuchtungssystems in reflektiver Darstellung;
- 10 Fig. 45 - 50: eine Ausgestaltung eines Typ C1-Beleuchtungssystems;
- Fig. 51 - 54: Ausleuchtung, Intensitätsverlauf, Scan-Energie und Pupillenausleuchtung eines Systems gemäß den Figuren 45 bis 50;
- 15 Fig. 55A-55B: eine Ausgestaltung der Erfindung mit virtueller Blendenebene.

Anhand der Fig. 1-20 soll zunächst theoretisch dargestellt werden, wie mit Hilfe der erfindungsgemäßen Beleuchtungseinrichtung für beliebige Beleuchtungsverteilungen A in einer Ebene ein System angegeben werden kann, das den Anforderungen in bezug auf Uniformität und Telezentrie genügt. Das dargestellte System ist ein System mit Feldwaben- und Pupillenwabenplatte.

20

In Figur 1 ist eine Prinzipskizze des Strahlengangs eines refraktiven Systemes mit zwei Wabenplatten abgebildet. Das Licht der Quelle 1 wird mit Hilfe einer Kollektorlinse 3 gesammelt und in ein paralleles oder konvergentes Lichtbündel umgewandelt. Die Feldwaben 5 der ersten Wabenplatte 7 zerlegen die Lichtbündel und erzeugen am Ort der Pupillenwaben 9 sekundäre Lichtquellen. Die Feldlinse 12 bildet diese sekundären Lichtquellen in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems bzw. die Eintrittspupille des nachfolgenden Objektives ab. Eine derartige Anordnung zeichnet sich durch

25

30

einen verflochtenen Strahlengang von Feld- und Pupillenebene von der Quelle bis zur Eintrittspupille des Objektivs aus. Hierfür wird oft auch die Bezeichnung "Köhlersche Beleuchtung" gewählt, wie beispielsweise in der US 5,677, 939 definiert, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in vorliegende  
5 Anmeldung mitaufgenommen wird.

Nachfolgend wird das Beleuchtungssystem gemäß Fig. 1 abschnittsweise betrachtet. Da die Schnittstelle die Licht- und Aperturverteilung in der Ebene der Feldwaben ist, kann die Betrachtung unabhängig von der Quellenart und  
10 dem Kollektorspiegel erfolgen.

In Fig. 2A und 2B ist für das zentrale Wabenpaar 20, 22 die Feld- und Pupillen-Abbildung eingezeichnet. Mit Hilfe der Pupillenwabe 22 und der Feldlinse 12 wird die Feldwabe 20 auf das Retikel 14 bzw. die abzubildende  
15 Maske abgebildet. Die geometrische Ausdehnung der Feldwabe 20 bestimmt die Form des ausgeleuchteten Feldes in der Retikelebene 14. Der Abbildungsmaßstab ist näherungsweise durch das Verhältnis der Abstände Pupillenwabe 22 - Retikel 14 und Feldwabe 20 - Pupillenwabe 22 gegeben. Die optische Wirkung der Feldwabe 20 ist so ausgelegt, daß am Ort der  
20 Pupillenwabe 22 ein Bild der Lichtquelle 1 entsteht, eine sekundäre Lichtquelle. Ist die Ausdehnung der Lichtquelle gering, beispielsweise näherungsweise punktförmig, so verlaufen alle Lichtstrahlen durch die optische Mitte der Pupillenwabe 22. In einem solchen Fall ist eine Beleuchtungseinrichtung realisierbar, bei der auf die Pupillenwabe verzichtet  
25 wird.

Wie in Fig. 2 B gezeigt, besteht die Aufgabe der Feldlinse 12 darin, die sekundären Lichtquellen in die Eintrittspupille 26 des Objektivs 24 abzubilden. Bringt man in den Strahlengang eine Feldlinse ein, so kann die Feldabbildung  
30 in der Weise beeinflußt werden, daß durch Steuerung der Verzeichnung das Bild der Feldwabe verformt wird. Denkbar ist, ein Rechteck in ein



Ringsegment zu verformen. Der Abbildungsmaßstab der Feldwabenabbildung wird dadurch nicht verändert.

5 In Figur 3 ist für eine spezielle geometrische Form einer Feldwabe und einer Pupillenwabe der Verlauf der Lichtstrahlen dargestellt.

10 In der in Figur 3 dargestellten Ausführungsform ist die Form der Feldwaben 20 rechteckig gewählt. Dabei entspricht das Aspektverhältnis der Feldwaben 20 dem Verhältnis von Bogenlänge zu Ringbreite des geforderten Ringfeldes in der Retikelebene. Das Ringfeld wird, wie in Fig. 4 dargestellt, durch die Feldlinse geformt. Ohne Feldlinse ergibt sich, wie in Fig. 3 gezeigt, in der Retikelebene ein Rechteckfeld.

15 Zur Formung des Ringfeldes 30 wird, wie in Fig. 4 dargestellt, eine grazing-incidence-Feldspiegel 32 verwandt. Unter der Nebenbedingung, daß die vom Retikel reflektierte Strahlung nicht mehr ins Beleuchtungssystem zurücklaufen darf, sind je nach Lage der Eintrittspupille des Objektivs ein oder zwei Feldspiegel 32 erforderlich.

20 Laufen die Hauptstrahlen divergent ins nicht dargestellte Objektiv, so genügt ein Feldspiegel 32, wie in Figur 4 dargestellt. Bei konvergentem Hauptstrahlverlauf benötigt man zwei Feldspiegel. Der zweite Feldspiegel muß die Orientierung des Ringes umdrehen. Eine derartige Konfiguration ist in Figur 5 gezeigt.

25 Bei einem Beleuchtungssystem im EUV-Wellenlängenbereich müssen alle Komponenten reflektiv ausgebildet werden.

30 Wegen der hohen Reflektionsverluste bei  $\lambda = 10 \text{ nm} - 14 \text{ nm}$  ist es vorteilhaft, daß die Zahl der Reflektionen so gering wie möglich gehalten werden.

Beim Aufbau des reflektiven Systems muß die gegenseitige Vignettierung der Strahlen berücksichtigt werden. Dies kann durch Aufbau des Systemes im Zick-Zack-Strahlengang erfolgen oder durch Arbeiten mit Obskurationen.

5 Nachfolgend soll das erfindungsgemäße Verfahren zum Erstellen eines Designs für ein EUV-Beleuchtungssystem bei beliebiger Ausleuchtung in einer Ebene A beispielhaft beschrieben werden.

10 Die für das erfindungsgemäße Verfahren erforderlichen Definitionen sind in Fig. 6 gezeigt.

Zunächst wird der Strahlengang für das zentrale Wabenpaar berechnet.

15 In einem ersten Schritt wird die Größe der Feldwaben 5 der Feldwabenplatte 7 bestimmt werden. Wie zuvor aufgezeigt, ergibt sich für Rechteckwaben das Aspektverhältnis ( $x/y$ ) aus der Form des Ringfeldes in der Retikelebene. Die Größe der Feldwaben wird bestimmt durch die Ausdehnung A der Intensitätsverteilung der beliebigen Lichtquelle in der Ebene der Feldwaben und der Anzahl N der Feldwaben auf der Wabenplatte, die wiederum durch  
20 die Zahl der sekundären Lichtquellen gegeben ist. Die Anzahl der sekundären Lichtquellen ergibt sich wiederum aus der Gleichmäßigkeit der Pupillenausleuchtung sowie der Durchmischung.

25 Die Wabenfläche  $A_{\text{Wabe}}$  einer Feldwabe mit  $x_{\text{Wabe}}$ ,  $y_{\text{Wabe}}$  kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$A_{\text{Wabe}} = x_{\text{Wabe}} \cdot y_{\text{Wabe}} = (x_{\text{Feld}} / y_{\text{Feld}}) \cdot y_{\text{Wabe}}^2$$

30 wobei  $x_{\text{Feld}}$ ,  $y_{\text{Feld}}$  die Größe des Rechteckes, das das Ringfeld festlegt, beschreibt. Weiter gilt für die Anzahl N der Feldwaben:

$$N = \frac{A}{A_{\text{Wabe}}} = \frac{A}{y_{\text{Wabe}}^2 \cdot (x_{\text{Feld}} / y_{\text{Feld}})}$$

5 Hieraus folgt für die Größe der einzelnen Feldwabe:

$$y_{\text{Wabe}} = \sqrt{\frac{A}{N \cdot (x_{\text{Feld}} / y_{\text{Feld}})}}$$

10 und

$$\frac{x_{\text{Wabe}}}{y_{\text{Wabe}}} = \frac{x_{\text{Feld}}}{y_{\text{Feld}}}$$

15

Die Wabengröße und die Größe des Rechteckfeldes legen den Abbildungsmaßstab  $\beta_{\text{Wabe}}$  der Wabenabbildung fest und damit das Verhältnis der Abstände  $d_1$  und  $d_2$ .

20

$$\beta_{\text{Wabe}} = \frac{x_{\text{Feld}}}{y_{\text{Feld}}} = \frac{d_2}{d_1}$$

25

Die vorgegebene Baulänge  $L$  für das Beleuchtungssystem und der Wabenabbildungsmaßstab  $\beta_{\text{Wabe}}$  bestimmen die absolute Größe von  $d_1$  und  $d_2$  und damit die Lage der Pupillenwabenplatte. Es gilt:

$$d_1 = \frac{L}{1 + \beta_{\text{Wabe}}}$$

30

$$d_2 = d_1 \cdot \beta_{\text{Wabe}}$$

$d_1$  und  $d_2$  bestimmen wiederum den Radius der Pupillenwaben.

5 Es gilt:

$$R_{\text{Pup}} = \frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}$$

10 Um die Pupillenwaben in die Eintrittspupille des Objektivs abzubilden und das Rechteckfeld in ein Ringfeld umzuformen, werden zwischen Pupillenwabe und Retikel eine oder mehrere Feldlinsen, vorzugsweise in Toroidform, eingebracht. Durch die Einführung der Feldspiegel wird die vorgegebene Baulänge vergrößert, da unter anderem die Spiegel Mindestabstände  
15 einhalten müssen, um Vignettierungen zu vermeiden.

Die Positionierung der Feldwaben hängt von der Intensitätsverteilung in der Ebene der Feldwaben ab. Die Zahl  $N$  der Feldwaben ist durch die Zahl der sekundären Lichtquellen vorgegeben. Die Feldwaben werden vorzugsweise  
20 derart auf der Feldwabenplatte angeordnet, daß sie die ausgeleuchtete Fläche, ohne sich gegenseitig zu vignettieren, abdecken.

Zur Positionierung der Pupillenwaben wird in der Eintrittspupille des Objektivs die Rasterung der sekundären Lichtquellen vorgegeben. Die sekundären  
25 Lichtquellen werden entgegen der Lichtrichtung durch die Feldlinse abgebildet. Die Blendenebene dieser Abbildung befindet sich in der Retikelebene. Die Bilder der sekundären Lichtquellen geben die  $(x, y, z)$ -Position der Pupillenwaben an. Als Freiheitsgrad für die Herstellung des Lichtweges zwischen Feld- und Pupillenwabe verbleibt der Kipp- und  
30 Drehwinkel.

Wird in einer Ausgestaltung der Erfindung jeder Feldwabe eine Pupillenwabe zugeordnet, so wird der Lichtweg durch Kippung und Drehung von Feld- und Pupillenwabe hergestellt. Hierbei werden die Strahlbüschel so umgelenkt, daß die Mittenstrahlen alle in der Retikelebene die optische Achse schneiden.

5

Die Zuordnung von Feld- und Pupillenwaben ist frei. Eine Möglichkeit der Zuordnung wäre, jeweils räumlich benachbarte Waben einander zuzuordnen. Dadurch werden die Umlenkwinkel minimal. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene auszugleichen. Dies kommt beispielsweise dann zum Tragen, wenn die Intensitätsverteilung in der Ebene der Feldwaben einen Verlauf aufweist. Haben Feld- und Pupillenwaben ähnliche Positionen, überträgt sich der Verlauf auf die Pupillenausleuchtung. Durch gezielte Durchmischung der Zuordnung kann die Intensität ausgeglichen werden.

10

15

Vorteilhafterweise werden die Einzelkomponenten Feldwabenplatte, Pupillenwabenplatte und Feldspiegel des Beleuchtungssystems im Strahlengang derart angeordnet, daß ein vignettierungsfreier Strahlenverlauf möglich ist. Hat eine derartige Anordnung Auswirkungen auf die Abbildung, so müssen die einzelnen Lichtkanäle und die Feldlinse nachoptimiert werden.

20

Mit dem zuvor beschriebenen Design-Verfahren können für beliebige Ausleuchtungen A mit zwei normal-incidence und ein bis zwei grazing-incidence-Reflektionen Beleuchtungssysteme für die EUV-Lithographie erhalten werden, die folgende Eigenschaften aufweisen:

25

- eine homogene Ausleuchtung beispielsweise eines Ringfeldes
- eine homogene und feldunabhängige Pupillenausleuchtung
- das Zusammenlegen von Austrittspupille des Beleuchtungssystems und Eintrittspupille des Objektivs
- das Einstellen einer vorgegebenen Baulänge

30

- die Aufnahme des maximal möglichen Lichtleitwertes.

Nachfolgend sollen für eine Ausführungsform der Erfindung mit Feld- und Pupillenwabenplatte Anordnungen von Feldwaben und Pupillenwaben beschrieben werden.

Zunächst werden unterschiedliche Anordnungen der Feldwaben auf der Feldwabenplatte betrachtet. Hierbei kann die Intensitätsverteilung beliebig sein.

Die angeführten Beispiele beschränken sich auf einfache geometrische Formen, wie Kreis, Rechteck, die Kopplung mehrerer Kreise bzw Rechtecke. Innerhalb des ausgeleuchteten Bereichs soll die Intensitätsverteilung homogen sein oder einen langsam variierenden Verlauf aufweisen. Die Aperturverteilung soll unabhängig vom Feld sein.

Bei kreisförmiger Ausleuchtung A der Feldwabenplatte 100 können die Feldwaben 102 zum Beispiel in Spalten und Zeilen angeordnet sein, wie in Figur 7 dargestellt. Alternativ hierzu können die Aufpunkte der Waben gleichmäßig durch Verschieben der Zeilen über die Fläche verteilt sein, wie in Figur 8 dargestellt. Letztere Anordnung ist besser an eine gleichmäßige Verteilung der sekundären Lichtquellen angepaßt.

Eine rechteckige Ausleuchtung A ist in Figur 9 dargestellt. Eine Verschiebung der Zeilen, wie in Figur 10 dargestellt, führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung der sekundären Lichtquellen. Diese sind jedoch entsprechend der Ausdehnung der Feldwabenplatte innerhalb eines Rechtecks angeordnet. Um dennoch die sekundären Lichtquellen in der kreisrunden Blendenebene verteilen zu können, wird eine Doppelfacettierung vorgesehen. Die Pupillenwaben sitzen am Ort der sekundären Lichtquellen. Bei rechteckiger Ausleuchtung ist es erforderlich, zur Herstellung des Lichtweges zwischen

Feld- und Pupillenwaben die Feldwaben so zu kippen, daß die Strahlbüschel auf die beispielsweise innerhalb eines Kreises angeordneten Pupillenwaben treffen, die ebenfalls gekippt werden müssen.

5 Setzt man die Ausleuchtung A der Feldwabenplatte 100 aus mehreren Kreisen A1, A2, A3, A4 zusammen, beispielsweise durch Kopplung von verschiedenen Strahlengängen einer oder mehrerer Quellen, so ist bei gleichbleibender Wabengröße die Durchmischung bei einer Anordnung der Waben in Zeilen und Spalten gemäß Figur 11 unzureichend. Eine gleichmäßigere Beleuchtung  
10 erhält man durch die Verschiebung der Wabenzeilen, wie in Figur 12 dargestellt.

Die Figuren 13 und 14 zeigen die Verteilung der Feldwaben 102 bei zusammengesetzter Ausleuchtung aus Einzelrechtecken A1, A2, A3, A4.

15

Nunmehr sollen beispielhafte Anordnungen der Pupillenwaben auf der Pupillenwabenplatte beschrieben werden.

20

Bei der Anordnung der Pupillenwaben sind zwei Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

25

1. Für die Minimierung der Kippwinkel von Feld- und Pupillenwaben zur Herstellung des Lichtweges ist es vorteilhaft, sich an die Anordnung der Feldwaben zu halten. Dies ist insbesondere bei näherungsweise  
kreisförmiger Ausleuchtung der Feldwabenplatte vorteilhaft.
2. Zur homogenen Pupillenfüllung sollen die sekundären Lichtquellen in der Eintrittspupille des Objektivs gleichmäßig verteilt sein. Dies kann erreicht werden, indem man in der Eintrittspupille des Objektivs eine gleichmäßige  
30 Rasterung von sekundären Lichtquellen vorgibt. Diese werden entgegen

der Lichtrichtung mit der Feldlinse in die Ebene der Pupillenwaben abgebildet und bestimmen dadurch den idealen Ort der Pupillenwaben.

Ist die Feldlinse verzeichnungsfrei, so entspricht die Verteilung der Pupillenwaben der Verteilung der sekundären Lichtquellen. Da die Feldlinse jedoch das Ringfeld formt, wird gezielt Verzeichnung eingeführt. Dabei handelt es sich nicht um rotationssymmetrische kissen- oder tonnenförmige Verzeichnung, sondern um die Verbiegung von horizontalen Linien zu Bögen. Der y-Abstand der Bögen bleibt im Idealfall konstant. Reale grazing-incidence-Feldspiegel zeigen jedoch auch eine zusätzliche Verzeichnung in y-Richtung.

In Figur 15 ist ein Gitter 110 von sekundären Lichtquellen 112 in der Eintrittspupille des Objektivs, die zugleich Austrittspupille des Beleuchtungssystems ist, gezeigt, wie es sich für verzeichnungsfreie Abbildung ergeben würde. Die Anordnung der sekundären Lichtquellen 112 entspricht genau der vorgegebenen Anordnung der Pupillenwaben.

Werden wie in Figur 16 die Feldlinsen zur Ringfeldformung eingesetzt, so liegen die sekundären Lichtquellen 112 auf Bögen 114.

Legt man die Pupillenwaben einzelner Zeilen auf Bögen, die die Verzeichnung vorhalten, so kann man die sekundären Lichtquellen wieder auf ein regelmäßiges Gitter legen.

Führt die Feldlinse zusätzlich Verzeichnung in y-Richtung ein, so wird die Pupille in y-Richtung verzerrt, wie in Figur 17 gezeigt.

Die Ausdehnung der ausgeleuchteten Fläche auf der Feldwabenplatte ist mit der Definition der Eingangsbeleuchtung vorgegeben. Die Ausleuchtung der Pupillenwabenplatte ist durch die Baulänge und die Apertur in der Retikelebene bestimmt.



Wie zuvor eingehend beschrieben, müssen durch Dreh und Kipp von Feld- und Pupillenwaben die beiden Flächen aufeinander abgestimmt werden.

5 Zur Veranschaulichung wird die Problematik an linear aufgezogenen Prinzipskizzen erläutert. Die Beispiele lassen sich jedoch direkt auf reflektive Systeme übertragen. Für eine kreisförmige Ausleuchtung der Feldwabenplatte sind verschiedene Fälle zu unterscheiden, wie nachfolgend dargestellt.

10 Wird durch Kipp der Feldwaben eine sammelnde Wirkung, durch Kipp der Pupillenwaben eine zerstreue Wirkung eingeführt, so kann der Bündelquerschnitt verringert werden. Die Kippwinkel der einzelnen Waben werden mit Hilfe der Mittenstrahlen für jedes Wabenpaar bestimmt. Für die Mittenstrahlen wirkt das System wie ein Tele-System, wie in Figur 18 gezeigt.

15 Inwieweit die Feldwaben gekippt werden müssen, hängt von der Konvergenz des eintreffenden Strahlbündels ab. Ist die Konvergenz an die Verringerung des Bündelquerschnitts angepaßt, können die Feldwaben ohne Kippwinkel auf einem Plansubstrat angebracht werden.

20 Ein Spezialfall ergibt sich, wenn die Konvergenz zwischen Feld- und Pupillenwabenplatte der Apertur am Retikel entspricht, wie in Figur 19 gezeigt.

25 Muß keine zerstreue Wirkung durch die Pupillenwaben eingeführt werden, so können sie ohne Flächenkippen eingesetzt werden. Wenn zudem die Lichtquelle einen sehr kleinen Lichtleitwert besitzt und die sekundären Lichtquellen nahezu punktförmig sind, kann auf die Pupillenwaben vollständig verzichtet werden.

30 Eine Vergrößerung des Bündelquerschnitts ist möglich, wenn durch Kipp der Feldwaben zerstreue Wirkung, durch Kipp der Pupillenwaben sammelnde

Wirkung eingeführt wird. Für die Mittenstrahlen wirkt das System wie ein Retrofokus-System, wie in Figur 20 gezeigt.

Entspricht die Divergenz der eintreffenden Strahlung der Büschelvergrößerung zwischen Feld- und Pupillenwaben, so können die Feldwaben ohne Flächenkippen verwendet werden.

Anstelle der beschriebenen runden Form sind auch rechteckige oder andere Formen der Ausleuchtung A der Feldwabenplatten möglich.

Die in den nachfolgend beschriebenen Figuren 21A-56 gezeigten Anordnungen zeigen Ausführungsformen der Erfindung bei der als Synchrotron-Strahlungslichtquellen Undulatoren verwendet werden, ohne daß die Erfindung hierauf beschränkt ist.

Die Strahlung der Undulator-Lichtquelle läßt sich auf eine Punktlichtquelle mit stark gerichteter Strahlung, beispielsweise beträgt die Divergenz sowohl in horizontaler wie vertikaler Richtung weniger als 10 mrad, zurückführen, weswegen alle nachfolgend beispielhaft beschriebenen Beleuchtungssysteme nur einen Spiegel bzw. eine Linse mit Rasterelementen aufweisen, ohne daß die Erfindung hierauf beschränkt ist.

Undulator-Quellen weisen in der ausgezeichneten Ebene in die das vorbestimmte Wellenlängenspektrum abgestrahlt wird, eine Strahldivergenz  $< 100$  mrad, vorzugsweise  $< 50$  mrad auf, weswegen Kollektoren entlang der Elektronenbahn zum Sammeln der Synchrotron-Strahlung und Bündeln derselben, wie beispielsweise in der US-A-5439781 oder US-A-5512759 für derartige Quellen beschrieben, nicht benötigt werden.

Nachfolgend sollen drei mögliche Ausgestaltungen eines Beleuchtungssystems mit Undulator-Quelle 200 und einem Spiegel mit Rasterelementen beschrieben werden.

5 Es bezeichnet:

Typ A eine Ausführungsform, bei der die einzelnen Rasterelemente des ersten Spiegels einzelne gekippte Planfacetten sind.

10 Typ B eine Ausführungsform, bei der die einzelnen Rasterelemente als Facetten im konvergenten Strahlengang ausgeführt sind.

Typ C eine Ausführungsform, bei der die Rasterelemente des ersten Spiegels mit den Strahlaufweitungsmitteln eine Baueinheit  
15 ausbilden.

In den Figuren 21A und 21B ist ein Beleuchtungssystem gemäß Typ A in einer refraktiven Ausführungsform zur Definition der Parameter dargestellt. Bei der Ausführungsform gemäß Typ A umfassen die Mittel zur Strahlaufweitung  
20 eine Zerstreuungslinse 206 bzw. Zerstreuungsspiegel ohne hierauf beschränkt zu sein.

Die sammelnde Wirkung zur Erzeugung der sekundären Lichtquellen wird durch den der Zerstreuungslinse bzw. dem Zerstreuungsspiegel 206 nachgeordneten Sammelspiegel bzw. Sammellinse 208 aufgebracht. Die Mittel zur  
25 Strahlaufweitung und der Spiegel bzw. die Linse mit sammelnder Wirkung bilden eine sogenannte Kollektoreinheit bzw. ein Kollektorsystem 210 aus. Ohne Spiegel mit Rasterelementen würde der Sammelspiegel die Quelle 200 in die Blendenebene 212 des Beleuchtungssystems abbilden. Mit dem Spiegel mit Rasterelementen 214 bzw. dem Facettenspiegel wird die  
30 sekundäre Lichtquelle 216 in eine Vielzahl von sekundären Lichtquellen 218 zerlegt.

Die Rasterelemente 214 können als Planfacetten ausgebildet werden, da die sekundäre Lichtquelle bzw. Lichtquellen in dieser Ausführungsform mit Hilfe der Kollektoreinheit in die Blendenebene abgebildet wird.

- 5 Die Kippwinkel der Planfacetten werden so eingestellt, daß die Mittenstrahlen jeder Facette in der Bildebene 220 auf der optischen Achse 222 zusammentreffen. Für die Mittenstrahlen wirkt der Facettenspiegel bzw. -linse wie ein zerstreuer Spiegel bzw. Linse. Zur Veranschaulichung zeigen die Figuren 21A und 21B den schematischen Aufbau anhand eines refraktiven,  
10 linear aufgebauten Systems. In Figur 21A wurde die Facettenlinse entfernt. Die sekundäre Lichtquelle 216 liegt in der Blendenebene. In Figur 21B ist die Facettenlinse 214 eingefügt. Dem Kipp der Facetten entspricht in der refraktiven Darstellung die Anordnung einzelner Prismen.
- 15 Möglich ist auch die Anordnung des Facettenspiegels bzw. -linse im konvergenten Strahlengang gemäß Typ B wie in den Figuren 22A und 22B gezeigt. Der Sammelspiegel 208 wird dabei so ausgelegt, daß die Quelle 200 in die Bildebene 220 des Beleuchtungssystems abgebildet wird, wie in Figur 22A gezeigt. Die sammelnde Wirkung der Facetten 214 wird dann so  
20 ausgelegt, daß in der Blendenebene 212 sekundäre Lichtquellen 218 erzeugt werden, wie in Figur 22B dargestellt.

- Bei der Ausführung der Erfindung gemäß Typ C werden wie in den Figuren 23A und 23B gezeigt, der Sammelspiegel bzw. -linse und der Facettenspiegel  
25 bzw. -linse vereint. Bei einer derartigen Ausgestaltung wird die sammelnde Wirkung des Kollektorspiegels den Facetten als Kipp überlagert. In der schematischen Darstellung in den Figuren 23A und 23B sind die Waben als Überlagerung von Prisma und Sammellinse angedeutet. In der reflektiven Ausführung handelt es sich um gekippte Sammelspiegel 224.

Nachfolgende Formeln beschreiben für die Beleuchtungsanordnung gemäß Typ A - C die Abbildung durch die Rasterelemente:

$$\begin{aligned}
 5 \quad NA_{Ret} &= \frac{DU_{BL} / 2}{d_5} & \Rightarrow DU_{BL} &= 2 \cdot d_5 \cdot NA_{Ret} \\
 \\ 
 10 \quad \frac{DU_{BL}}{x_{Wabe}} \cdot \frac{d_4 + d_5}{d_5} &= 4.0 & \Rightarrow x_{Wabe} &= \frac{DU_{BL}}{4.0} \cdot \frac{d_5}{d_4 + d_5} \\
 \\ 
 \beta_{Wabe} &= \frac{x_{Feld}}{x_{Wabe}} = \frac{d_5}{d_4} & \Rightarrow \beta_{Wabe} &= \frac{x_{Feld}}{x_{Wabe}} \\
 \\ 
 15 \quad & & \Rightarrow d_4 &= \frac{d_5}{\beta_{Wabe}}
 \end{aligned}$$

Die Vorgaben sind:

$d_5$ : Maß für die Baulänge.

$NA_{Ret}$ : Apertur in Retikelebene.

20 Anzahl der Waben in einer Wabenzeile = 4 bei vorliegender Ausführungsform.

Dies ist ein Maß für die Anzahl der sekundären Lichtquellen, der Uniformität des Feldes und der gleichmäßigen Ausleuchtung der Pupille.

$x_{Feld}$ : x-Ausdehnung des Feldes

$DU_{BL}$ :  $\varnothing$  Blende

25  $x_{Wabe}$ : x-Ausdehnung Wabe

$y_{Wabe}$ : y-Ausdehnung Wabe

Werden die in den Figuren 21A bis 23B beispielhaft für refraktive Systeme gezeigten Beleuchtungssysteme für 13 nm-EUV-Strahlung designt, so müssen  
 30 diese für die 13 nm-Strahlung reflektiv und aufgrund der hohen Reflektionsverluste mit möglichst wenigen Reflektionen umgesetzt werden.

Bei Verwendung einer Undulator-Quelle als Lichtquelle sind zur Ausleuchtung des Spiegels mit Rasterelementen Strahlaufweitungsmittel, die mit einem Sammelspiegel zu einer Kollektoreinheit zusammengefaßt werden können, erforderlich.

5

Für eine Undulator-Quelle kann die Kollektoreinheit bei 13 nm-Strahlung aus einem ersten grazing incidence Spiegel oder einem Scanspiegel, der die Strahlung aufweitet, und einem zweiten normal incidence Spiegel, der wieder sammelnd auf die Strahlung wirkt, bestehen.

10

Um zu einem vorteilhaften Design bei 13 nm Wellenlänge zu gelangen, sind aufgrund der höheren Reflektivität grazing incidence Spiegel ( $R \approx 80\%$ ) normal incidence Spiegeln ( $R \approx 65\%$ ) vorzuziehen.

15

Vorteilhafterweise sollte der Abstand  $d_1$  von der Quelle zum ersten Spiegel mindestens  $d_1 = 3000$  mm betragen. Bei einer derartigen Ausführungsform sollte zwischen dem ersten Spiegel und der restlichen Optik für die Strahlenschutzwand ein Freiraum von 2000 mm eingehalten werden.

20

Alternativ zur Anordnung mit erstem Spiegel vor der Strahlenschutzwand und zweitem Spiegel nach der Strahlenschutzwand kann der erste Spiegel auch erst nach der Strahlenschutzwand mit  $d_1 > 5000$  mm angebracht werden. Er kann dann grazing oder normal incidence ausgeführt werden.

25

Vorteilhafterweise strahlt die Quelle in horizontaler Richtung ab.

Das horizontal liegende Retikel wird unter einem Hauptstrahlwinkel von höchstens  $20^\circ$ , bevorzugt  $10^\circ$ , besonders bevorzugt  $5,43^\circ$ , beleuchtet.

30

Eine horizontale Anordnung von Retikel und Wafer ist notwendig, um ein Durchbiegen der Optik im Gravitationsfeld zu vermeiden.

Vorteilhafterweise werden zur Feldformung zwei grazing-incidence Feldspiegel verwandt, um das Retikel mit korrekter Ringorientierung zu beleuchten und das Licht separiert vom Beleuchtungssystem ins Objektiv zu lenken.

5 In Figur 24 sind in schematischer Darstellung Beleuchtungssysteme gemäß Typ A und B gezeigt.

Das System gemäß Typ A und B besteht aus einem Kollektorspiegel 300, der als grazing incidence Toroidspiegel, der das Strahlbüschel aufweitet,  
10 ausgebildet ist und einem normal incidence Kollektorspiegel 302, der den Spiegel mit Rasterelementen 304 rund ausleuchtet und die Lichtquelle entweder in die Blendenebene (Typ A) oder in die Retikelebene (Typ B) abbildet.

15 Mit Bezugsziffer 304 ist der normal incidence Facettenspiegel bzw. Spiegel mit Rasterelementen bezeichnet. Die Feldspiegel 306, 308 sind als grazing incidence Feldspiegel ausgebildet und formen das Feld in der Retikelebene.

Die Systemparameter können so ausgelegt werden, daß die optische Achse  
20 jeweils nur um die x-Achse gekippt wird ( $\alpha$ -Kipp). Die Meridionalebene bleibt dabei erhalten. Die Abstände der Spiegel werden auf die Randbedingungen der Quelle abgestimmt.

Ein derartiges System vom Typ A wird nachfolgend im einzelnen beschrieben.  
25

Als Rasterelemente werden einzeln gekippte Planfacetten verwandt. Die Undulator-Quelle wurde als homogener Flächenstrahler mit  $\varnothing$  1.0 mm und  $NA_{Und} = 0.001$  angenommen.

30 Zur gleichmäßigen Verteilung der sekundären Lichtquellen in der Blendenebene wurden die Facettenzeilen 310 versetzt zueinander angeordnet

wie in Figur 25 gezeigt. Der Kreis 312 in Fig. 25 zeigt die Ausleuchtung des Spiegels mit Rasterelementen, vorliegend Planfacetten 314 durch die aufgeweitete Undulator-Quelle 200.

Die Anordnung der Spiegel, bezogen auf das globale Koordinatensystem der Quelle, des in den Figuren 26 bis 33 gezeigten Typ A-Beleuchtungssystems ist in Tabelle Tab. 1 zusammengestellt.

Komponente	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	AOI [°]	
Quelle	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
Zerstreuungsspiegel	0.000	0.000	5000.000	80.000	0.000	0.000	80.000	g.i.
Sammelspiegel	0.000	1026.060	7819.078	-15.000	0.000	180.000	5.000	n.i.
Spiegel mit Facetten	0.000	878.459	6981.991	155.000	0.000	0.000	15.000	n.i.
Blende	0.000	1007.017	7135.200	-40.000	0.000	180.000	0.000	-
Feldspiegel 1	0.000	1906.231	8206.842	38.858	0.000	180.000	78.858	g.i.
Feldspiegel 2	0.000	2039.021	8276.605	16.573	0.000	0.000	78.857	g.i.
Retikel	0.000	2287.899	8300.263	90.000	180.000	0.000	5.430	n.i.
EP Objektiv	0.000	68.158	8511.263	90.000	0.000	0.000	0.000	-

Tab. 1: Anordnung der Spiegel für Typ A.

X, Y, Z: Koordinatenursprung der Komponenten.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ : Drehwinkel der Flächen.

AOI: Inzidenzwinkel der optischen Achse an den Komponenten.

g.i./n.i.: grazing incidence/normal incidence.

Die z-Achse der Retikelebene steht unter 90° zur z-Achse des Quellkoordinatensystems.



Der z-Abstand zwischen Quelle 200 und Kollektorspiegel 300 beträgt bei dem nachfolgend beschriebenen System 5000 mm. Für die Strahlenschutzwand 316 ist ein z-Abstand zwischen Kollektorspiegel 300 und Facettenspiegel 304 von 1900 mm vorgesehen.

5

Die Retikelebene 318 liegt 2287.9 mm über der Quelle.

Das Design soll nun anhand der Figuren 26 bis 33 beschrieben werden:

10

Figur 26 zeigt das Gesamtsystem bis zur Eintrittspupille 320 des Objektivs im yz-Schnitt umfassend Quelle 200 und Zerstreuungsspiegel 300, Sammelspiegel 302, Plan-Facettenspiegel 304, Feldspiegel 306, 308, Retikelebene 318 und Eintrittspupille 320 des Objektivs. Eingezeichnet sind für die zentrale Feldwabe (0,0) und die beiden äußersten Feldwaben jeweils die Mittenstrahlen. Sie treffen sich in der Retikelebene 318 und leuchten die Eintrittspupille 3320 des Objektivs aus.

15

Figur 27 zeigt einen Ausschnitt ab dem Kollektorspiegel. Deutlich zu sehen ist die Strahlumlenkung der Randstrahlen mit den gekippten Facetten.

20

Figur 28 stellt ein Fan von Strahlen, der die zentrale Wabe (0,0) 322 trifft, dar. Der Kollektorspiegel erzeugt in der Blendenebene die sekundäre Lichtquelle 212. Die Feldspiegel formen das Ringfeld und bilden die sekundäre Lichtquelle in die Eintrittspupille des Objektivs ab.

25

Figur 29 zeigt das Gesamtsystem mit Objektiv im yz-Schnitt umfassend: Zerstreuungsspiegel 300, Sammelspiegel 302, Plan-Facettenspiegel 304, Feldspiegel 306, 308, Retikelebene 318 und 4-Spiegel-Projektionsobjektiv 330. Das Strahlbüschel läuft getrennt vom Beleuchtungssystem ins Objektiv. Selbstverständlich sind auch andere Projektionsobjektive möglich, beispielsweise 5- oder 6-Spiegel-Objektive.

30

In Figur 30 ist die Ausleuchtung des Retikels mit einem 30°-Ringfeld ( $r = 211 \text{ mm}$ ;  $-3.0 \text{ mm} < \Delta r < +3.0 \text{ mm}$ ) in Höhenlinien-Darstellung mit einem System gemäß der Figuren 27 bis 29 gezeigt. Hierbei ist  $r$  der Ringradius, wobei aus dem Ring ein 30°-Segment verwendet wird.

5

In Figur 31 ist ein Intensitätsschnitt parallel zur y-Achse bei  $x = 0.0, 15 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 45 \text{ mm}$  dargestellt. Aufgrund der minimalen Ausdehnung der sekundären Lichtquellen entsteht ein ideales "Hut"-Profil. Die Breite der Intensitätsprofile nimmt zum Feldrand hin wegen der Ringkrümmung und der nicht optimalen Überlagerung der Teilbilder zu. Um die Scanenergie konstant zu halten, nimmt die Maximalintensität in gleichem Maße ab. Für den Lithographie-Prozeß entscheidend ist die integrale Scanenergie, d.h. die Integration der Intensität entlang des Scan-Weges. Die integrale Scan-Energie ist, wie in Figur 32 gezeigt, bei vorliegender Ausführungsform nahezu homogen. Sie kann durch das Design der optischen Elemente, wie Feldspiegel oder Feldlinse, gesteuert werden.

10

15

Figur 33 schließlich zeigt die Pupillenausleuchtung in der Feldmitte. Entsprechend der Wabenverteilung ergeben sich Intensitäts-Peaks 332 in der Pupillenausleuchtung. Die maximale Apertur beträgt  $NA_{\text{Ret}} = 0.025$ . Die Apertur einer Teilpupille ist entsprechend dem kleinen Lichtleitwert der Undulator-Quelle vernachlässigbar klein ( $NA_{\text{Teilpupille}} = 2E-6$ ).

20

Dennoch ergibt sich integral gesehen durch die gleichmäßige Verteilung der sekundären Lichtquellen eine Füllung der Pupille.

25

In den Figuren 34 bis 41 wird eine Ausführungsform der Erfindung gemäß Typ B mit facettiertem Spiegel im konvergenten Strahlengang gezeigt. Die Lichtquelle wird, wie bei der Ausführungsform gemäß den Figuren 26 bis 33 beschrieben, angenommen. Die Facetten bzw. Rasterelemente sind wie in

30

Figur 25 angeordnet und als sammelnde Hohlfacetten, die auf einer planen Trägerfläche aufgebracht sind, ausgebildet.

Die Anordnung der Spiegel bezogen auf das globale Koordinatensystem der Quelle ist in Tabelle Tab. 2 zusammengestellt:

Komponente	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	AOI [°]	
Quelle	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
Zerstreuungsspiegel	0.000	0.000	5000.000	80.000	0.000	0.000	80.000	g.i.
Sammelspiegel	0.000	1026.060	7819.078	-15.000	0.000	180.000	5.000	n.i.
Spiegel mit Facetten	0.000	913.189	7178.953	155.000	0.000	0.000	15.000	n.i.
Blende	0.000	1041.747	7332.162	-40.000	0.000	180.000	0.000	-
Feldspiegel 1	0.000	1917.187	8375.471	38.858	0.000	180.000	78.858	g.i.
Feldspiegel 2	0.000	2049.977	8445.234	16.573	0.000	0.000	78.857	g.i.
Retikel	0.000	2298.855	8468.892	90.000	180.000	0.000	5.430	n.i.
EP Objektiv	0.000	79.114	8679.892	90.000	0.000	0.000	0.000	-

Tab. 2: Anordnung der Spiegel für Typ B.

X, Y, Z: Koordinatenursprung der Komponenten.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ : Drehwinkel der Flächen.

AOI: Inzidenzwinkel der optischen Achse an den Komponenten.

g.i./n.i.: grazing incidence/normal incidence.

Die z-Achse der Retikelebene steht unter 90° zur z-Achse des Quellkoordinatensystems.

Der z-Abstand zwischen Quelle 200 und Sammelspiegel 302 beträgt 5000 mm. Für die nicht dargestellte Strahlenschutzwand ist ein z-Abstand zwischen Zerstreuungsspiegel 300 und dem Facettenspiegel 304 von 2100 mm vorgesehen.

Die Retikelebene 318 liegt 2298.9 mm über der Quelle.

Figur 34 zeigt das Gesamtsystem bis zur Eintrittspupille 320 des Objektivs im yz-Schnitt umfassend: Quelle 200, Zerstreuspiegel 300, Sammelspiegel 302, Facettenspiegel 304, Feldspiegel 306, 308, Retikelebene 318, Eintrittspupille Objektiv 320. Eingezeichnet sind für die zentrale Feldwabe (0,0) und die  
5 beiden äußeren Feldwaben jeweils die Mittenstrahlen, die sich in der Retikelebene treffen und die Eintrittspupille des Objektivs ausleuchten.

In Figur 35 ist ein Ausschnitt ab dem Zerstreuspiegel 300 dargestellt. Die eingezeichneten Randstrahlen werden vom Facettenspiegel 304 nicht  
10 beeinflußt, da es sich um Mittenstrahlen handelt und die Facetten auf einer planen Trägerplatte angebracht sind.

In Figur 36 eingezeichnet ist ein Fan von Strahlen, der die zentrale Wabe (0,0) trifft. Die sammelnde Wirkung der Wabe erzeugt in der Blendenebene die  
15 sekundäre Lichtquelle. Die Feldspiegel 306, 308 formen das Ringfeld und bilden die sekundäre Lichtquelle in die Eintrittspupille des Objektivs ab.

Figur 37 zeigt das Gesamtsystem mit Objektiv im yz-Schnitt umfassend: Zerstreuspiegel 300, Sammelspiegel 302, Facettenspiegel 304 im  
20 konvergenten Strahlengang, Feldspiegel 306, 308, Retikelebene 318 und 4-Spiegler-Objektiv 330. Das Strahlbüschel läuft getrennt vom Beleuchtungssystem ins Objektiv.

In Figur 38 dargestellt ist die Ausleuchtung des Retikels mit dem 30°-Ringfeld  
25 ( $r = 211 \text{ mm}$ ;  $-3.0 \text{ mm} < \Delta r < +3.0 \text{ mm}$ ) in Höhenlinien-Darstellung. Hierbei ist  $r$  der Ringradius, wobei aus dem Ring ein 30°-Segment verwendet wird.

Figur 39 zeigt einen Intensitätsschnitt parallel zur y-Achse bei  $x = 0,0, 15 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 45 \text{ mm}$ . Aufgrund der minimalen Ausdehnung der sekundären  
30 Lichtquellen entsteht ein ideales "Hut"-Profil zumindest in der Feldmitte. Die Breite der Intensitätsprofile nimmt zum Feldrand hin wegen der

Ringkrümmung und der nicht optimalen Überlagerung der Teilbilder zu. Die Maximalintensität nimmt mit der Verbreiterung der Flanken und der größeren Halbwertsbreite ab, so daß die Scan-Energie konstant bleibt.

- 5 Wie Figur 40 zeigt, ist die integrale Scan-Energie vorliegender Ausführungsform nahezu homogen.

In Figur 41 dargestellt ist die Pupillenausleuchtung in der Feldmitte.

- 10 Nachfolgend sollen Beleuchtungssysteme vom Typ C beschrieben werden. Die Undulator-Lichtquelle wird wie zuvor als punktförmige Lichtquelle angenommen.

- 15 Das System gemäß Typ C umfaßt in einer ersten Ausführungsform gemäß Typ C1 einen ersten grazing incidence Kollektorspiegel 400 der die Strahlung nach unten ablenkt. Der Spiegel 400 weitet den Strahl auf und beleuchtet den facettierten Spiegel 402, der die Strahlung wieder Richtung Undulator-Quelle 200 umkehrt. Um zu einer vignettierungsfreien Lösung zu kommen, führt der facettierte Spiegel 402 zusätzlich einen Kipp der optischen Achse um die y-Achse, den sogenannten  $\beta$ -Kipp, ein. Dadurch läuft die Systemachse an der Strahlenschutzwand vorbei.
- 20

Figur 42 zeigt die Seitenansicht in der y-z-Ebene eines derartigen Systems, Figur 43 die Draufsicht in der x-z-Ebene.

25

Die zweite Ausführungsform Typ C2 eines Systems gemäß Typ C zeigt Figur 44.

30

Beim System gemäß Typ C2 ist der grazing incidence Spiegel 402 durch einen normal incidence Spiegel ersetzt. Dies hat zur Folge, daß die Systemachse nach den zwei Reflektionen bei Spiegel 402 und facettiertem

Spiegel 404 wieder von der Undulator-Quelle weg läuft. Die Spiegel müssen dann nur um die x-Achse gekippt werden, sogenannter  $\alpha$ -Kipp. Ein Kipp der optischen Achse um die y-Achse wie beim Typ C1 ist nicht erforderlich. Der Spiegel 402 zur Strahlaufweitung befindet sich beim Typ C2 außerhalb der Quellschleife. Da die Quellstrahlung in horizontaler Richtung nahezu linear polarisiert ist, kann die optische Achse beim Strahlaufweitungsspiegel 402 auch um größere Winkel ohne große Verluste umgelenkt werden.

In den Figuren 45 bis 54 ist ein System gemäß Typ C1 nochmals eingehender dargestellt.

Die Anordnung der Spiegel dieses in den Figuren 45 bis 54 gezeigten Systems ist in Tabelle Tab. 3 zusammengestellt.

Komponente	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	AOI [°]	
Quelle	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
Zerstreuungsspiegel	0.000	0.000	5000.000	-80.000	0.000	0.000	80.000	g.i.
Spiegel mit Raster- elementen	0.000	-1026.060	7819.078	31.039	9.462	179.084	14.501	n.i.
Blende	-63.666	-897.503	7679.723	222.692	-18.562	16.366	0.000	-
Feldspiegel 1	-493.075	-30.412	6739.809	138.466	-18.880	-15.994	78.858	g.i.
Feldspiegel 2	-531.728	146.641	6655.203	-18.117	203.471	-7.425	78.857	g.i.
Retikel	-539.593	345.744	6637.988	270.000	0.000	24.554	5.430	n.i.
EP Objektiv	-627.274	-1873.997	6446.069	90.000	0.000	155.446	0.000	-

Tab. 3: Anordnung der Spiegel für Typ C1.

X, Y, Z: Koordinatenursprung der Komponenten.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ : Drehwinkel der Flächen.

AOI: Inzidenzwinkel der optischen Achse an den Komponenten.

g.i./n.i.: grazing incidence/normal incidence.

Die z-Achse der Retikelebene steht unter  $90^\circ$  zur z-Achse des Quellkoordinatensystems.

5 Der z-Abstand zwischen Quelle und Zerstreuspiegel beträgt 5000 mm. Durch den Kipp des Facettenspiegels um die x- und y-Achse wird die zurücklaufende optische Achse so gedreht, daß das Objektiv nicht mit dem Beleuchtungsstrahlengang und der Strahlenschutzwand in die Quere kommt.

10 Der Facettenspiegel liegt um -1026.1 mm unter der Quelle, die Retikelebene 345.79 mm über der Quelle.

Das beispielhafte Design vom Typ C1 soll nun anhand der Abbildungen näher beschrieben werden:

15 Figur 45 zeigt das Gesamtsystem bis zur Eintrittspupille des Objektivs im yz-Schnitt umfassend: Quelle 200, Zerstreuspiegel 402, facettierter Spiegel 404 mit sammelnder Wirkung, Feldspiegel 406, 408, Retikelebene 408, Eintrittspupille 410 des Objektivs. Eingezeichnet sind für die zentrale Feldwabe (0,0) und die beiden äußersten Feldwabens jeweils die  
20 Mittenstrahlen. Sie treffen sich in der Retikelebene und leuchten die Eintrittspupille des Objektivs aus.

Figur 46 zeigt einen Ausschnitt ab dem Zerstreuspiegel 400 im x-z-Schnitt. Die eingezeichneten Randstrahlen werden vom Facettenspiegel so umgelenkt,  
25 daß sie in der Retikelebene zusammentreffen.

In Figur 47 ist der Ausschnitt ab dem Zerstreuspiegel 400 im x-z-Schnitt dargestellt. Der facettierte Spiegel 402 mit sammelnder Wirkung kippt die optische Achse vom einlaufenden Strahlbüschel weg. Dadurch wird für das  
30 Objektiv und die Strahlenschutzwand Platz geschaffen.

In Figur 48 ist ein Fan von Strahlen, der die zentrale Wabe (0,0) trifft, eingezeichnet. Die sammelnde Wirkung der Wabe erzeugt in der Blendenebene die sekundäre Lichtquelle. Die Feldspiegel 404, 406 formen das Ringfeld und bilden die sekundäre Lichtquelle 412 in die Eintrittspupille 410 ab.

Figur 49 zeigt das Gesamtsystem mit Objektiv im y-z-Schnitt umfassend Zerstreuspiegel 400, facettierter Spiegel 402 mit sammelnder Wirkung, Feldspiegel 404, 406, Retikelebene 410, 4-Spiegel-Objektiv 430. Das Strahlenbündel läuft getrennt vom Beleuchtungssystem ins Objektiv.

In Figur 50 ist das Gesamtsystem mit Objektiv im x-y-Schnitt dargestellt. In dieser Ansicht wird die Trennung von Objektiv und dem Beleuchtungsstrahlengang zwischen Zerstreuspiegel 400 und Facettenspiegel 402 deutlich.

Figur 51 zeigt die Ausleuchtung des Retikels mit dem 30°-Ringfeld ( $r = 211\text{mm}$ ;  $-3.0\text{ mm} < \Delta r < +3.0\text{ mm}$ ) in Höhenlinien-Darstellung.

In Figur 52 ist ein Intensitätsschnitt parallel zur y-Achse bei  $x = 0.0, 15\text{ mm}, 30\text{ mm}, 45\text{ mm}$  dargestellt.

Wie aus Figur 53 zu ersehen, ist die integrale Scan-Energie vorliegender Ausführungsform homogen.

Die Pupillenausleuchtung in der Feldmitte eines Systems vom Typ C1 ist in Figur 54 dargestellt.

Ist es nicht erforderlich, daß die Blendenebene zugänglich ist, so kann man auch mit einer virtuellen Blendenebene arbeiten. Das Licht würde dann die



Spiegelfacetten divergent verlassen. Gemäß Typ B und Typ C wären die Facetten nicht sammelnd, sondern zerstreudend ausgebildet.

Für Typ C ist folgender Fall vorstellbar. Der erste Kollektorspiegel erzeugt eine virtuelle sekundäre Lichtquelle 1000, wie in Abb. 55A gezeigt. Die divergierenden Strahlen werden von Planspiegeln so umgelenkt, daß ihre Mittenstrahlen die Retikelebene auf der optischen Achse schneiden. Die gekippten Planspiegel sind in Abb. 55B als Prismen dargestellt. Dadurch werden in der virtuellen Blendenebene eine Vielzahl von sekundären Lichtquellen 1002, erzeugt.

Folgende Formeln beschreiben den Zusammenhang der Systemparameter gemäß den Figuren 55A und B:

$$NA_{Ret} = \frac{DU_{BL}/2}{d_4} \quad \Rightarrow \quad DU_{BL} = 2 \cdot d_4 \cdot NA_{Ret}$$

$$\frac{DU_{BL}}{x_{Wabe}} \cdot \frac{d_4 - |d_3|}{d_4} = 4.0 \quad \Rightarrow \quad x_{Wabe} = \frac{DU_{BL}}{4.0} \cdot \frac{d_4}{d_4 - |d_3|}$$

$$\beta_{Wabe} = \frac{x_{Feld}}{x_{Wabe}} = \frac{d_4}{|d_3|} \quad \Rightarrow \quad \beta_{Wabe} = \frac{x_{Feld}}{x_{Wabe}}$$

$$\Rightarrow |d_3| = \frac{d_4}{\beta_{Wabe}}$$

wobei:

$d_4$ : Maß für die Baulänge.

$NA_{Ret}$ : Apertur in Retikelebene.

Anzahl der Waben in einer Wabenzeile = 4. Dies ist ein Maß für die Anzahl der sekundären Lichtquellen, der Uniformität des Feldes und der gleichmäßigen Ausleuchtung der Pupille.

$x_{\text{Feld}}$ : x-Ausdehnung des Feldes.

Aus der schematischen Darstellung gemäß den Figuren 55A - B wird deutlich, daß für die Undulator-Quelle mit  $NA_{\text{Quelle}} = 0.001$  die Abstände  $d_2$  und  $d_3$  ungefähr gleich groß sind. Zusammen mit einer realisierbaren Baulänge wird dies in der praktischen Umsetzung einen normal incidence Kollektorspiegel erfordern.

Um die scharfen Intensitäts-Peaks wie zum Beispiel in Figur 54 gezeigt in der Pupille zu verschmieren und den Lichtleitwert effektiv zu erhöhen, kann bei sämtlichen Ausführungsformen der Erfindung der letzte Feldspiegel als sich bewogender Spiegel, sogenannter wobbelnder Feldspiegel, ausgelegt werden. Die Bewegung eines wobbelnden Feldspiegels verändert primär die Aperturwinkel und hat geringen Einfluß auf die Feldlage.

Neben einer Bewegung des gesamten Spiegels ist auch eine periodische Oberflächenänderung des letzten Spiegels denkbar, um die Verschmierung der scharfen Intensitäts-Peaks in der Pupille zu erreichen.

Zur Reduzierung des Waben-Aspekt-Verhältnisses ist die Verwendung astigmatischer Facetten möglich. Dadurch wird die Blendenebene in eine sagittale und eine tangential Blendenebene aufgespalten. Die torischen Feldspiegel bilden diese zwei Ebenen in die Eintrittspupille des Objektives ab.

Durch das Design der Feldlinse kann die Beleuchtungsverteilung in der Retikelebene beeinflußt werden. Zum Beispiel kann dadurch eine uniforme Scanenergie erreicht werden.

Zur Steuerung der Scan-Uniformität kann bei einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung einer der beiden Feldspiegel als aktiver Spiegel ausgeführt sein.

Die azimutale Verzeichnung kann durch mehrere Aktuatorzeilen, die in y-Richtung verlaufen, gesteuert werden.

## PATENTANSPRÜCHE

- 5 1. Beleuchtungssystem für Wellenlängen  $\leq 193$  nm, insbesondere für die EUV-Lithographie mit
- 1.1 mindestens einer Lichtquelle, die in einer vorbestimmten Fläche eine Ausleuchtung A aufweist;
- 1.2 mindestens einer Einrichtung zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen;
- 1.3 mindestens einer Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend  
10 mindestens einen Spiegel oder eine Linse, der bzw. die in Rasterelemente gegliedert ist;
- 1.4 ein oder mehrere optische Elemente, die zwischen der Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend mindestens einen Spiegel oder eine Linse, der bzw. die in Rasterelemente gegliedert ist, und der  
15 Retikelebene angeordnet sind, wobei die optischen Elemente die sekundäre Lichtquelle in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems abbilden;
- das Beleuchtungssystem ist dadurch gekennzeichnet, daß
- 1.5 die Lichtquelle eine Lichtquelle zur Erzeugung von Strahlung mit einer  
20 Wellenlänge  $\leq 193$  nm ist, die in eine ausgezeichnete Ebene mit einem Wellenlängenspektrum abstrahlt, wobei der für die Anwendung, insbesondere für die Lithographie verwendete Wellenlängenbereich eine Strahldivergenz senkrecht zu dieser Ebene aufweist, die kleiner als 5 mrad ist.
- 25 2. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die vorbestimmte Fläche auf dem ersten Spiegel oder Linse mit Rasterelementen liegt.

3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle in der ausgezeichneten Ebene eine Strahldivergenz  $< 100$  mrad aufweist.
- 5 4. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Beleuchtungssystem Mittel zur Aufweitung des Strahles senkrecht zur ausgezeichneten Ebene umfaßt.
- 10 5. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle eine Synchrotronstrahlungsquelle zur Erzeugung von EUV-Strahlung, ist.
- 15 6. Beleuchtungssystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die EUV-Strahlung eine Wellenlänge im Bereich von 10nm bis 15nm aufweist.
- 20 7. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle im für die Anwendung, insbesondere die Lithographie verwendeten Wellenlängenbereich, in der ausgezeichneten Ebene eine Strahldivergenz aufweist, die kleiner als 5 mrad ist.
- 25 8. Beleuchtungssystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zur Aufweitung des Strahles in der ausgezeichneten Ebene und senkrecht zur ausgezeichneten Ebene vorgesehen sind.
9. Beleuchtungssystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zum Sammeln des aufgeweiteten Lichtstrahles vorgesehen sind.
- 30 10. Beleuchtungssystem nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Strahlaufweitung derart geformt und ausgestaltet sind,

daß die Mittel zum Sammeln des aufgeweiteten Lichtstrahles weitgehend vollständig ausgeleuchtet werden.

- 5 11. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Strahlaufweitung einen Zerstreuspiegel bzw. eine Zerstreulinse umfassen.
- 10 12. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Strahlaufweitung einen Scanspiegel umfassen.
- 15 13. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 4 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchrotron-EUV-Strahlungsquelle einen Bending-Magneten umfaßt.
- 20 14. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 4 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchrotron-EUV-Strahlungsquelle einen Wiggler umfaßt.
- 25 15. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 4 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchrotron-EUV-Strahlungsquelle eine Undulator-Quelle umfaßt.
- 30 16. Beleuchtungssystem nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß in dem für die Anwendung, insbesondere für die Lithographie, verwendeten Wellenlängenbereich der Raumwinkel, in den die Undulator-Quelle abstrahlt, kleiner  $\pm 5$  mrad ist.
17. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des ersten Spiegels sekundäre Lichtquellen erzeugen.

- 5 18. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels oder der Linse, die in Rasterelemente gegliedert ist, derart geformt und angeordnet sind, daß die Bilder der Rasterelemente durch die optischen Elemente in der Retikelebene zum überwiegenden Teil zur Deckung kommen und daß die durch Apertur und Füllgrad definierte Austrittspupille beleuchtet wird.
- 10 19. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Spiegelvorrichtung einen Spiegel oder eine Linse mit Rasterelementen, die als Feldwaben ausgebildet sind, umfaßt.
- 15 20. Beleuchtungssystem gemäß einem der Ansprüche 8 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zum Sammeln des aufgeweiteten Lichtstrahles eine Kollektoreinrichtung mit mindestens einem Sammelspiegel oder einer Sammellinse umfassen.
- 20 21. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Kollektoreinheit derart aufgebaut ist, daß die Fläche des ersten Spiegels mit Rasterelementen eine Ausleuchtung A aufweist.
- 25 22. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausleuchtung des ersten Spiegels mit Rasterelementen rund ist.
23. Beleuchtungssystem gemäß einem der Ansprüche 20 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Kollektoreinrichtung die Lichtquelle in eine Blendenebene abbildet.

24. Beleuchtungssystem gemäß einem der Ansprüche 20 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente als Planfacetten ausgebildet sind.
- 5 25. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Planfacetten des Spiegels mit Rasterelementen auf der Spiegeloberfläche derart gekippt angeordnet werden, daß die Mittenstrahlen jeder Planfacette in der Retikelebene bzw. Bildebene auf der optischen Achse zusammentreffen.
- 10 26. Beleuchtungssystem gemäß einem der Ansprüche 20 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente Prismen sind, die derart orientiert und angeordnet sind, daß die Mittenstrahlen jedes Prismas in der Bildebene auf der optischen Achse zusammentreffen.
- 15 27. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Kollektoreinrichtung die Lichtquelle in die Bildebene abbildet.
- 20 28. Beleuchtungssystem nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente sammelnde Wirkung aufweisen, derart, daß in einer Blendenebene sekundäre Lichtquellen ausgebildet werden.
- 25 29. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß der Zerstreuungsspiegel ein grazing-incidence-Spiegel ist.
- 30 30. Beleuchtungssystem nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand Lichtquelle zu Zerstreuungsspiegel oder Scanspiegel mindestens 2000 mm beträgt.



31. Beleuchtungssystem nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand von Zerstreuspiegel oder Scanspiegel zur weiteren Optik des Beleuchtungssystems, umfassend einen Kollektorspiegel, mindestens einen Spiegel, der in Rasterelemente gegliedert ist sowie optische Elemente, die die sekundäre Lichtquelle in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems abbilden, mindestens 1000 mm beträgt.
32. Beleuchtungssystem nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß Zerstreuspiegel und die weiteren optischen Elemente derart angeordnet sind, daß die optische Achse, die an der Strahlungsquelle in einer horizontalen Ebene läuft, derart umgelenkt wird, daß die optische Achse auf ein in einer horizontalen Ebene angeordnetes Retikel unter einem vorgegebenen Winkel trifft.
33. Beleuchtungssystem nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel zwischen Flächennormale und optischer Achse am Retikel höchstens  $20^\circ$ , vorzugsweise  $10^\circ$  beträgt.
34. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Kollektoreinrichtung und der Spiegel bzw. die Linse mit Rasterelementen ein einziges Bauteil ausbilden.
35. Beleuchtungssystem nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels bzw. der Linse mit Rasterelementen derart ausgestaltet sind, daß durch die Anordnung der Rasterelemente die sammelnde Wirkung einer Kollektorlinse oder eines Kollektorspiegels dargestellt wird.
36. Beleuchtungssystem nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels mit Rasterelementen auf der Spiegeloberfläche derart gekippt angeordnet werden, daß die

Mittenstrahlen jedes Rasterelementes in der Retikelebene auf der optischen Achse zusammentreffen.

- 5 37. Beleuchtungssystem nach Anspruch 35 oder 36, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente sammelnde Wirkung aufweisen, derart, daß in einer Blendenebene sekundäre Lichtquellen ausgebildet werden.
- 10 38. Beleuchtungssystem nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente Prismen sind, die derart orientiert und angeordnet sind, daß die Mittenstrahlen jedes Prismas in der Retikelebene auf der optischen Achse zusammentreffen.
- 15 39. Beleuchtungssystem nach Anspruch 36 oder 38, dadurch gekennzeichnet, daß ein strahlaufweitendes Element (300) zwischen der Synchrotronstrahlungsquelle und einer Strahlenschutzeinrichtung angeordnet ist.
- 20 40. Beleuchtungssystem nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand von Strahlungsquelle und den Mitteln zur Strahlaufweitung mindestens 2000 mm beträgt.
- 25 41. Beleuchtungssystem nach Anspruch 39 oder 40, dadurch gekennzeichnet, daß der Spiegel oder die Linse mit Rasterelementen derart angeordnet ist, daß die optische Achse, die an der Strahlungsquelle in einer horizontalen Ebene verläuft, derart umgelenkt wird, daß die optische Achse auf ein horizontal angeordnetes Retikel unter einem vorbestimmten Winkel trifft.
- 30 42. Beleuchtungssystem nach Anspruch 41, dadurch gekennzeichnet, daß der Spiegel oder die Linse mit Rasterelementen derart angeordnet ist,

daß die optische Achse so gekippt wird, daß der Lichtstrahl an der Strahlenschutzeinrichtung vorbeigeleitet wird.

- 5      43.    Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 39 bis 42, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der Mittel zur Strahlaufweitung zur weiteren Optik des Beleuchtungssystems wenigstens 1000 mm beträgt.
- 10      44.    Beleuchtungssystem nach Anspruch 36 oder 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Strahlaufweitung, räumlich hinter der Strahlenschutzeinrichtung für die Synchrotronstrahlenquelle angeordnet sind.
- 15      45.    Beleuchtungssystem nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß der Spiegel oder die Linse mit Rasterelementen derart angeordnet ist, daß die optische Achse, die an der Strahlungsquelle in einer horizontalen Ebene verläuft, derart umgelenkt wird, daß die optische Achse unter einem vorbestimmten Winkel auf ein horizontal angeordnetes Retikel trifft.
- 20      46.    Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Aufweitung des Lichtstrahles eine Einrichtung mit einem Spiegel oder einer Linse umfassen, die derart bewegt werden kann, daß der Lichtstrahl eine vorbestimmte Fläche auf dem ersten Spiegel mit Rasterelementen überstreicht.
- 25      47.    Beleuchtungssystem nach Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, daß die vorbestimmte Fläche rund ist.
- 30      48.    Beleuchtungssystem nach Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchrotronstrahlungsquelle einen Wiggler umfaßt.

49. Beleuchtungssystem nach Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchrotronstrahlungsquelle ein Bending-Magnet umfaßt.
50. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 46 bis 49, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Spiegel oder Linsen mit Rasterelementen vorgesehen sind, wobei der erste Spiegel oder die erste Linse eine Vielzahl von Feldwaben und der zweite Spiegel oder die zweite Linse eine Vielzahl von Pupillenwaben umfaßt.
51. Beleuchtungssystem nach Anspruch 50, dadurch gekennzeichnet, daß die Pupillenwaben am Ort der sekundären Lichtquellen sitzen.
52. Beleuchtungssystem nach Anspruch 51, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Pupillenwabe eine Feldwabe zugeordnet ist und die Pupillenwaben die Feldwaben in die Retikelebene abbilden.
53. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 50 bis 52, dadurch gekennzeichnet, daß die Feldwaben auf dem ersten Spiegel oder der ersten Linse derart angeordnet sind, daß sie sich nicht überschneiden und ihre Bilder die auszuleuchtende Fläche in der Retikelebene abdecken.
54. Beleuchtungssystem nach Anspruch 53, dadurch gekennzeichnet, daß die vorbestimmte Ausleuchtung A nicht rotationssymmetrisch ist.
55. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 50 bis 54, dadurch gekennzeichnet, daß die Pupillenwaben auf dem zweiten Spiegel oder der zweiten Linse derart angeordnet sind, daß deren Bilder die durch die optischen Elemente erzeugt werden, die Austrittspupille mit einem vorbestimmten Muster ausleuchten.

56. Beleuchtungssystem nach Anspruch 55, dadurch gekennzeichnet, daß das vorbestimmte Muster kreisförmig oder ringförmig ist.
57. Beleuchtungssystem nach Anspruch 55, dadurch gekennzeichnet, daß das vorbestimmte Muster die Form eines Quadropols aufweist.
58. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 55 bis 57, dadurch gekennzeichnet, daß durch entsprechende Anordnung, insbesondere Verdrehung und Verkipfung von Feld- und Pupillenwabe auf den Spiegeln zueinander, ein Lichtweg zwischen einem Paar von Feld- und Pupillenwaben aufgebaut wird.
59. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 55 bis 57, dadurch gekennzeichnet, daß durch Orientierung und Wahl des Ablenk winkels des prismatischen Anteils von Feld- und Pupillenwabe der Linsen ein Lichtweg zwischen einem Paar von Feld- und Pupillenwaben aufgebaut wird.
60. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 50 bis 59, dadurch gekennzeichnet, daß ein verketteter Strahlengang von Feld- und Pupillenebene, insbesondere Köhlersche Beleuchtung realisiert wird.
61. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 60, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Elemente bewegliche oder verformbare Spiegel oder Linsen umfassen.
62. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 61, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Elemente aktive Linsen oder Spiegel zur Uniformity-Korrektur umfassen.

63. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 62, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens einer der Feldspiegel ein wobbelnder Feldspiegel ist.

5 64. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 63, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente der bzw. des ersten in Rasterelemente gegliederten Spiegels oder Linse zur Reduzierung des Wabenaspektverhältnisses als astigmatische Feldwaben ausgebildet sind.

10 65. EUV-Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie

- mit einem Beleuchtungssystem nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 64
- einer Maske auf einem Trägersystem
- 15 - einem Projektionsobjektiv
- einem lichtempfindlichen Objekt auf einem Trägersystem.

20 66. EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 65, ausgeführt als Scanning-System.

25 67. EUV-Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 65 bis 66, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungsstärke am lichtempfindlichen Objekt - bei strukturloser Maske - weniger als  $\pm 5\%$ , vorzugsweise weniger als  $\pm 2\%$  ortsabhängige Unterschiede aufweist.

30 68. EUV-Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 65 bis 67, dadurch gekennzeichnet, daß die Scan-Energie am lichtempfindlichen Objekt - bei strukturloser Maske - weniger als  $\pm 5\%$ , vorzugsweise weniger als  $\pm 2\%$ , ortsunabhängige Unterschiede aufweist.

- 5
69. EUV-Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 65 bis 68, dadurch gekennzeichnet, daß ein für EUV transparentes Vakuumfenster im Strahlengang angeordnet ist.
- 10
70. EUV-Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 69, dadurch gekennzeichnet, daß ein Vakuumfenster an einer Einschnürung des Lichtbündels im Beleuchtungssystem angeordnet ist.
71. Verfahren zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen, insbesondere Halbleiterchips mit einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem der Ansprüche 65 bis 69.

FIG. 1

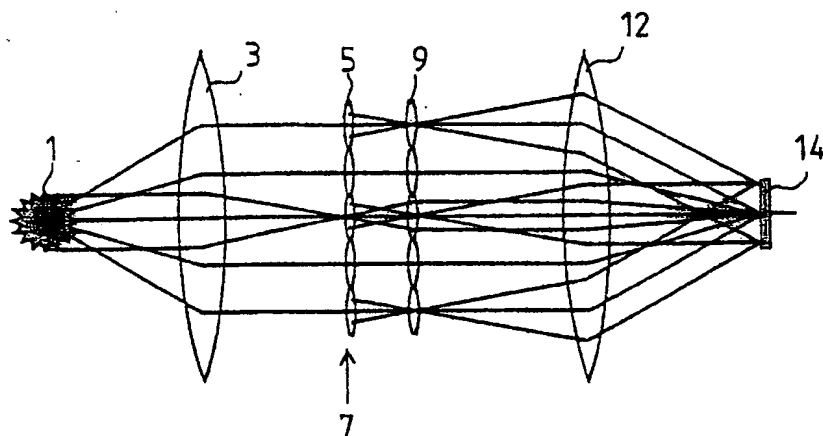


FIG. 2A

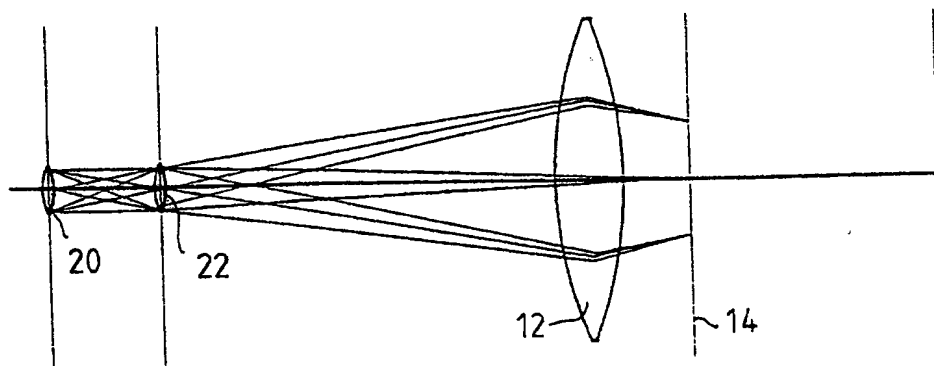


FIG. 2B

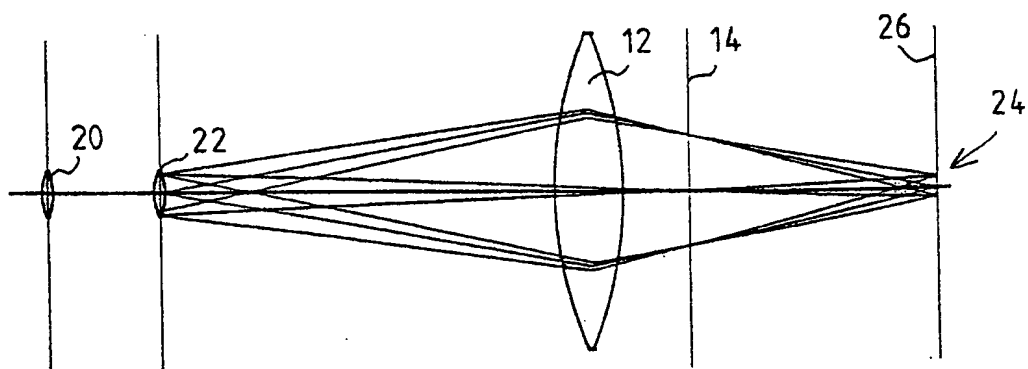




FIG. 3

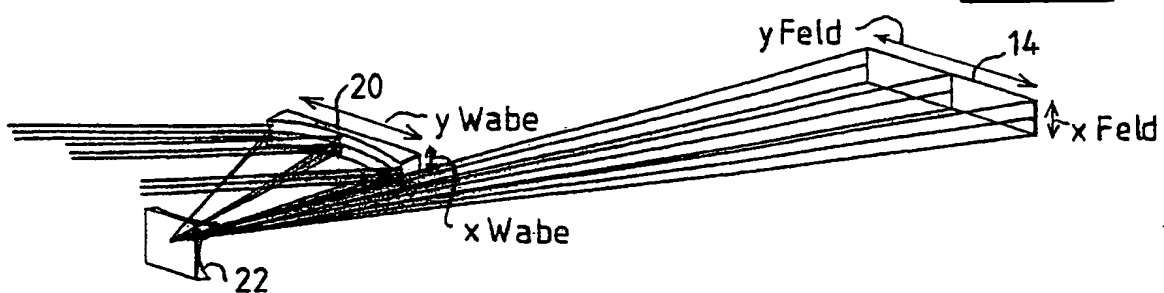


FIG. 4

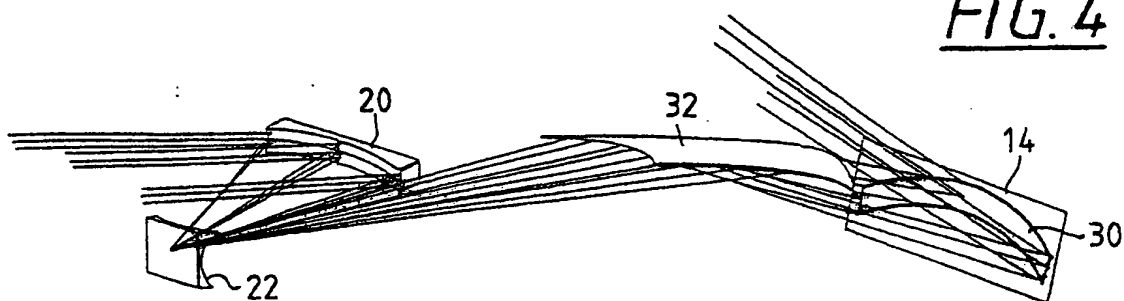


FIG. 5

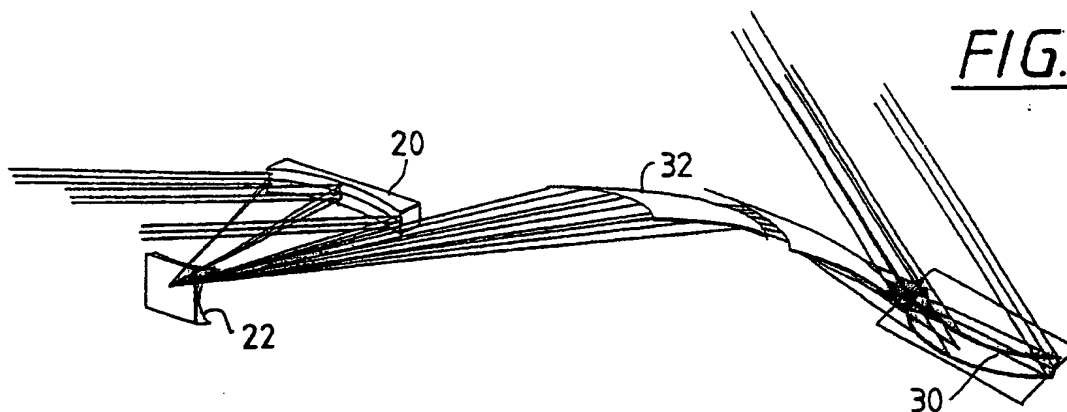
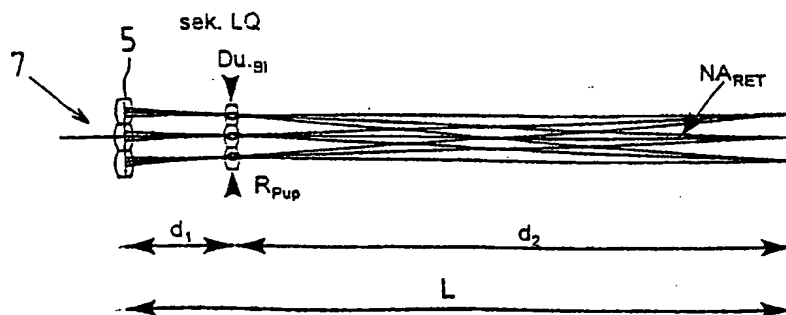


FIG. 6



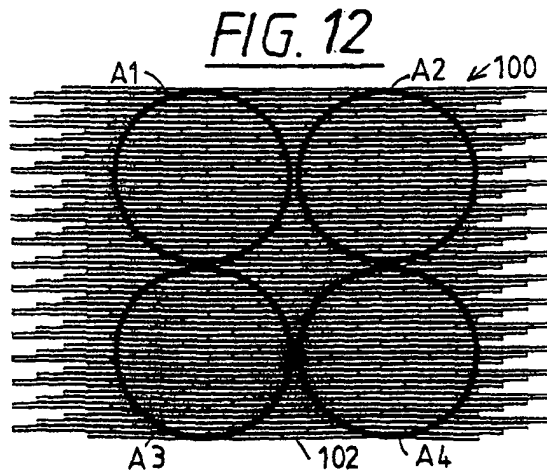
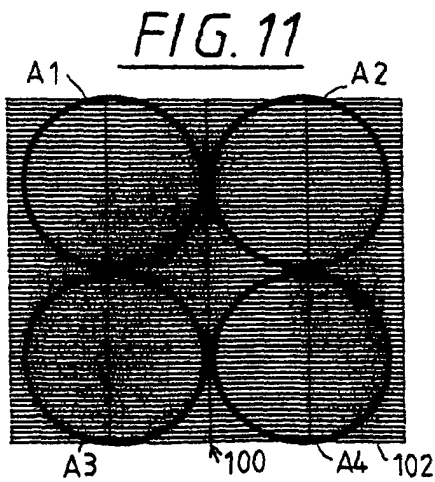
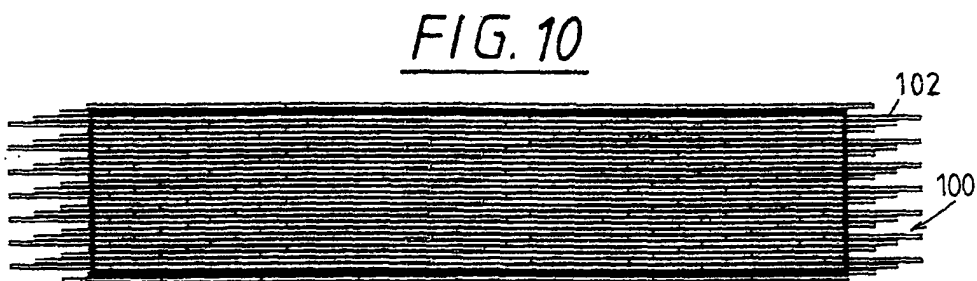
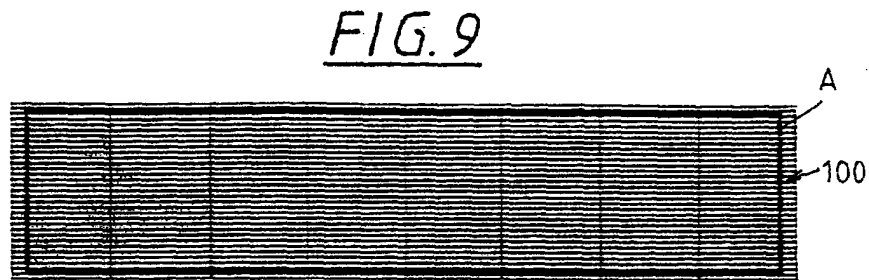
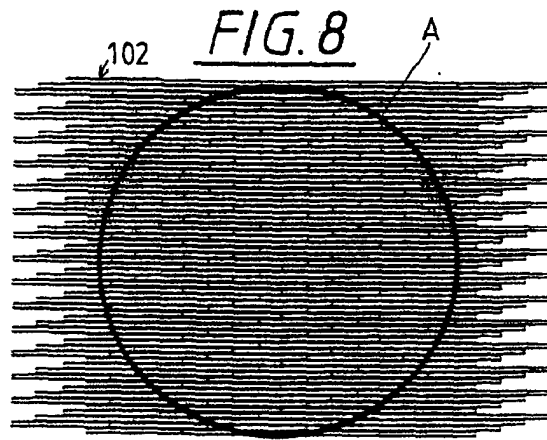
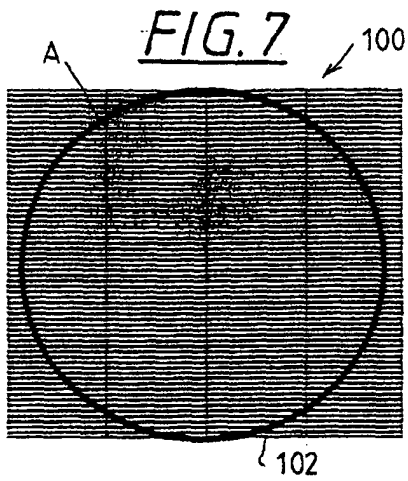


FIG. 13

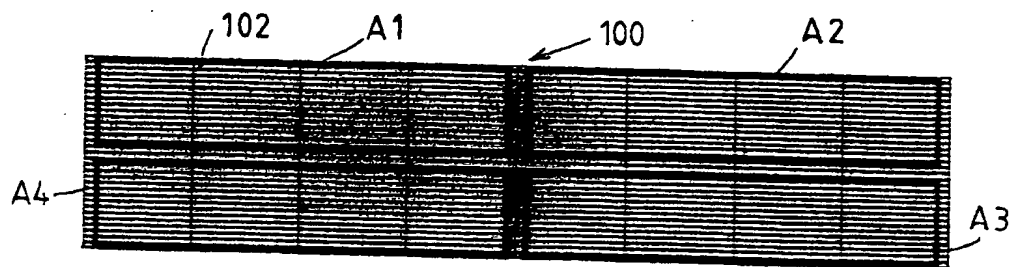


FIG. 14

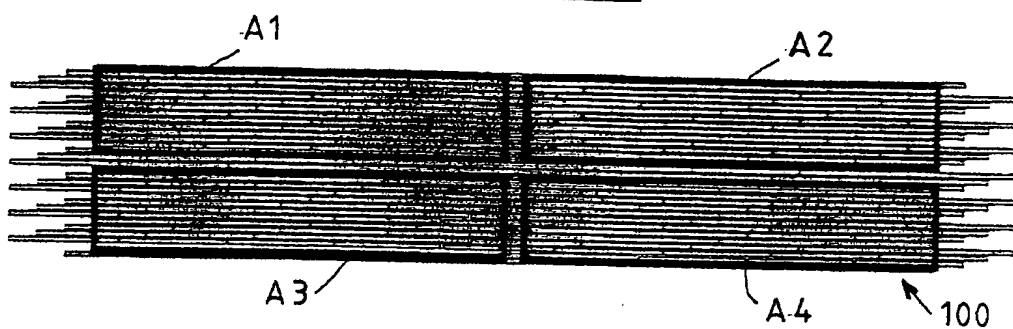


FIG. 15

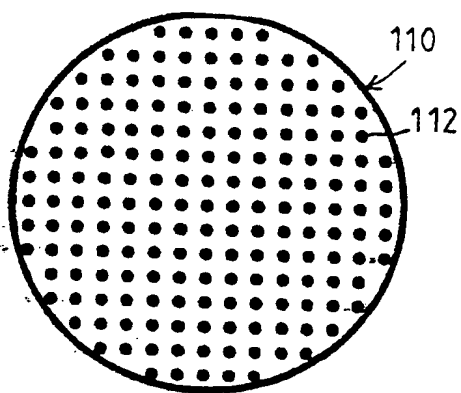
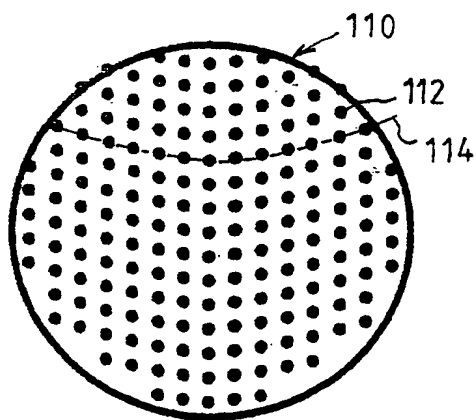


FIG. 16



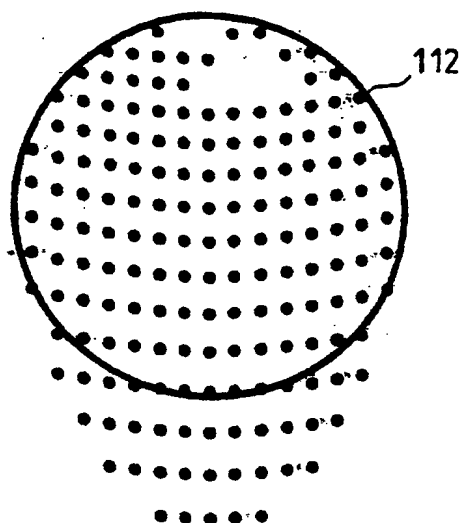


FIG. 17

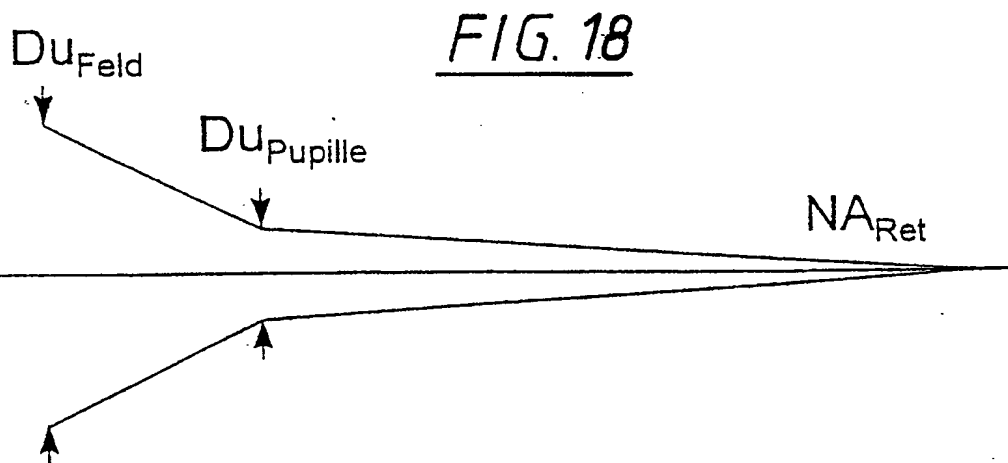


FIG. 18

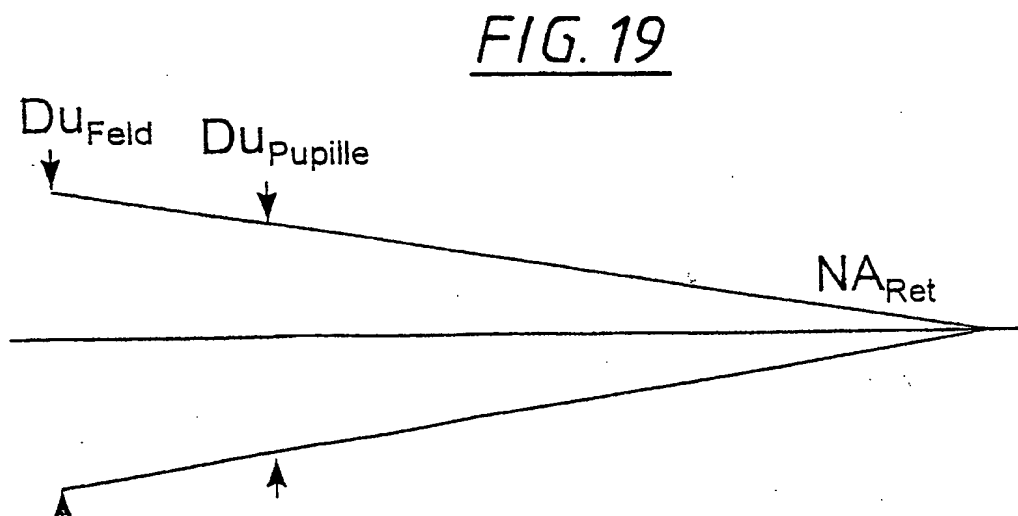


FIG. 19

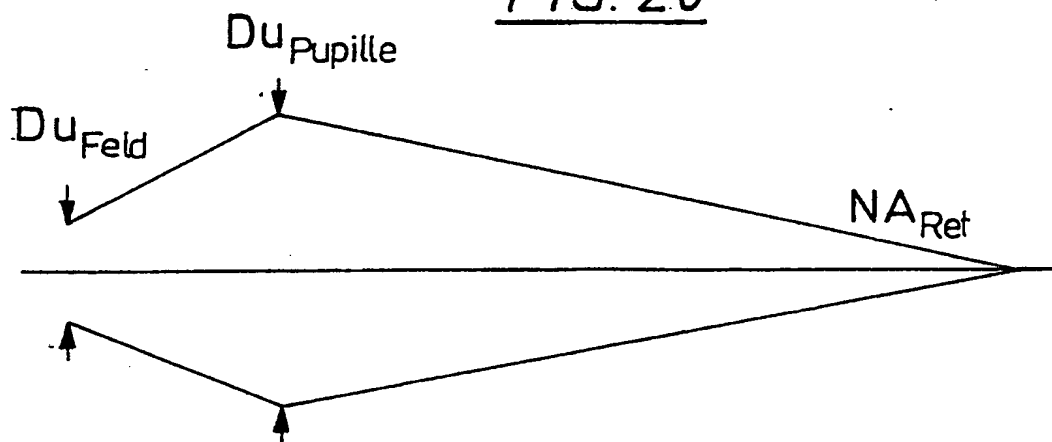
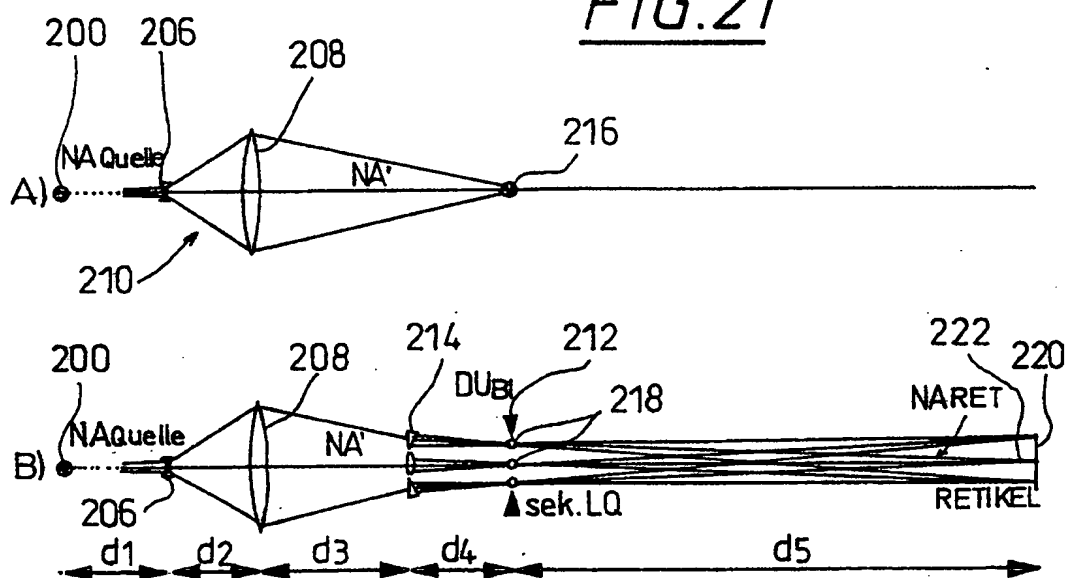
FIG. 20FIG. 21

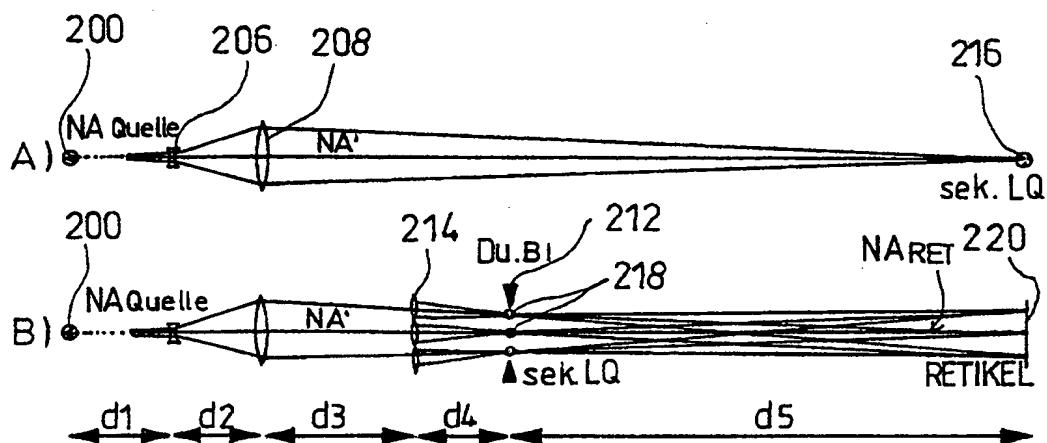
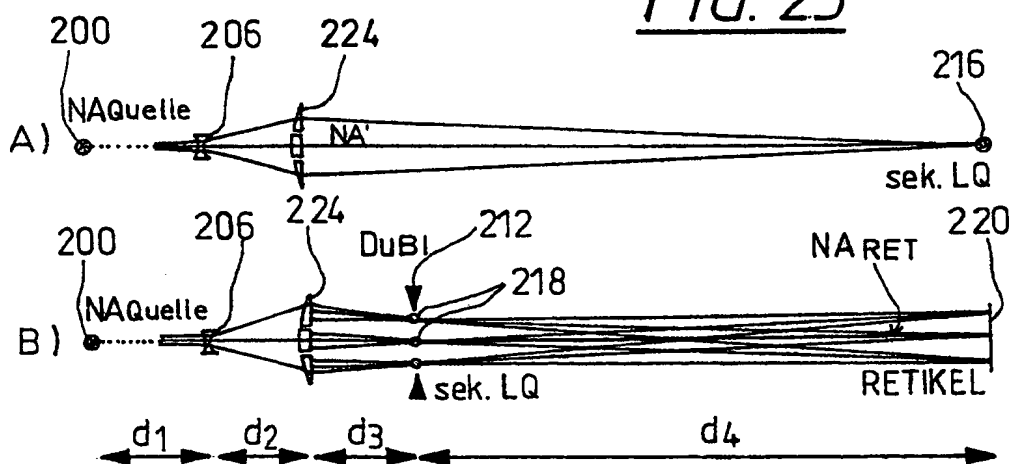
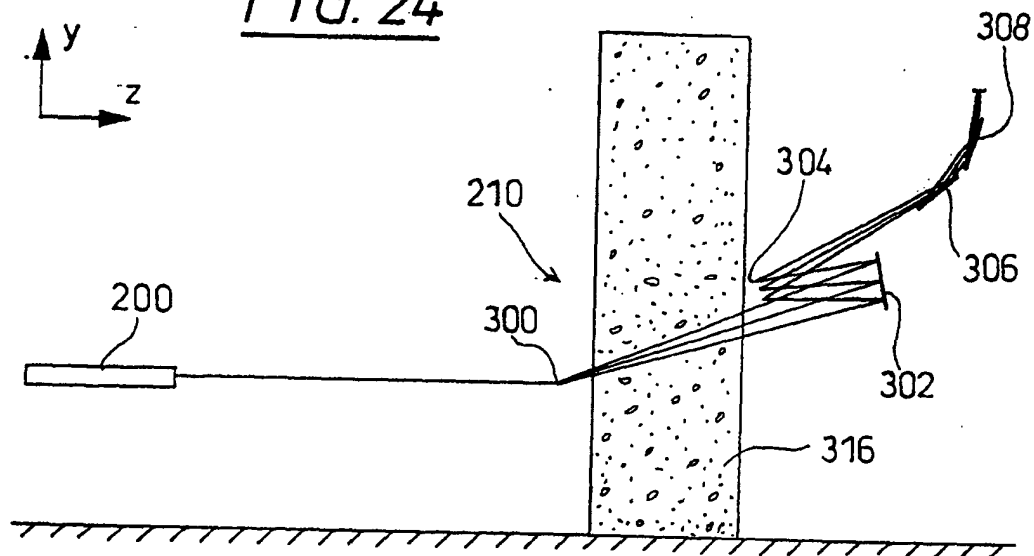
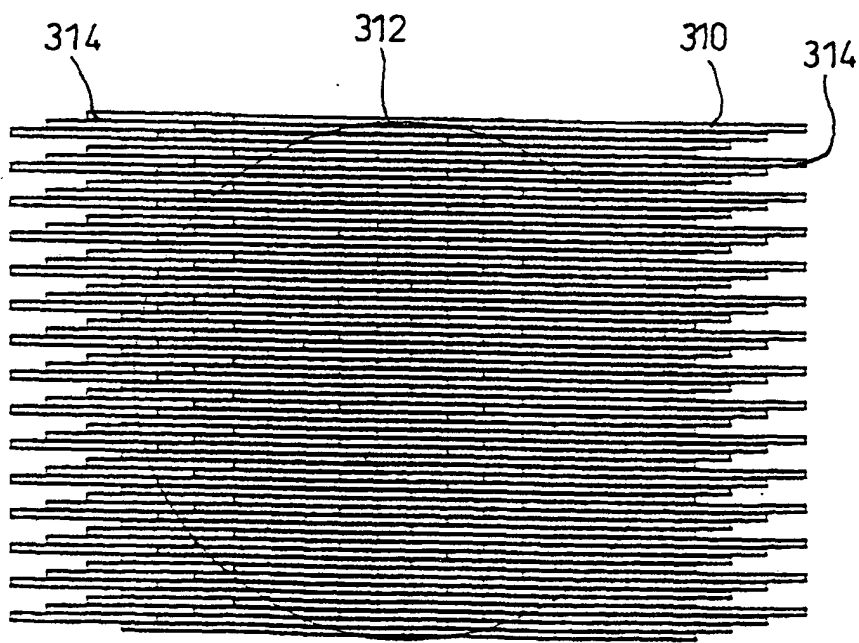
FIG. 22FIG. 23

FIG. 24FIG. 25

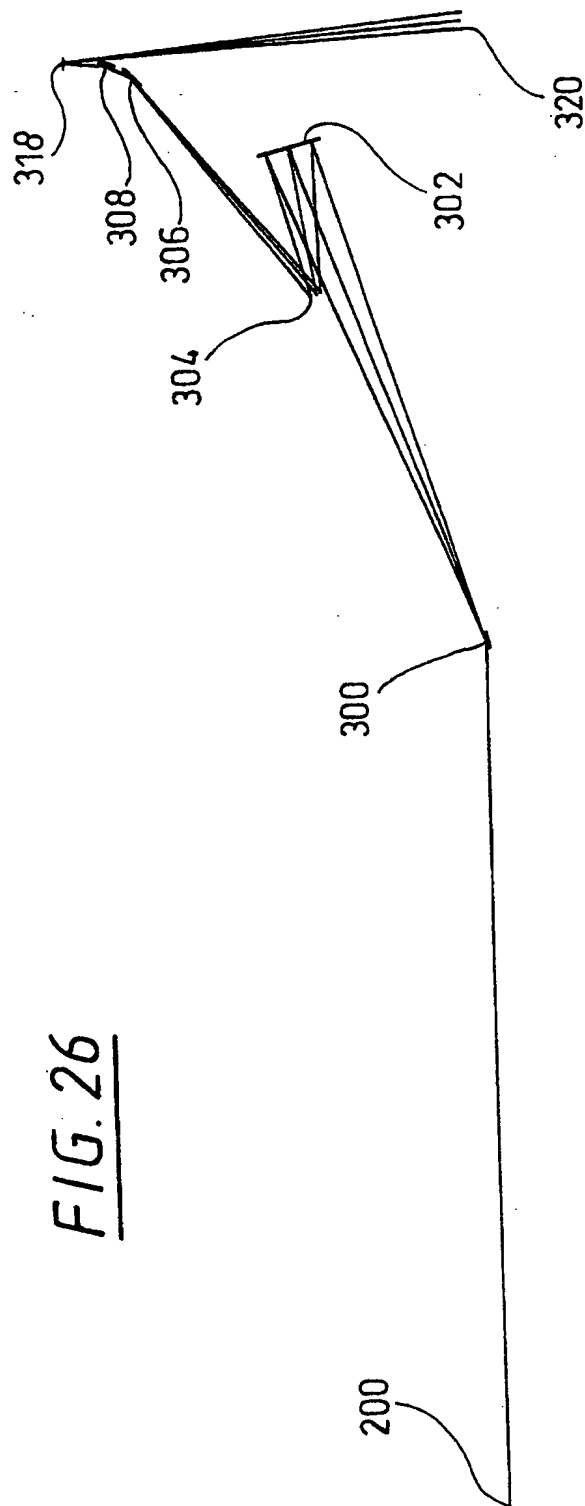
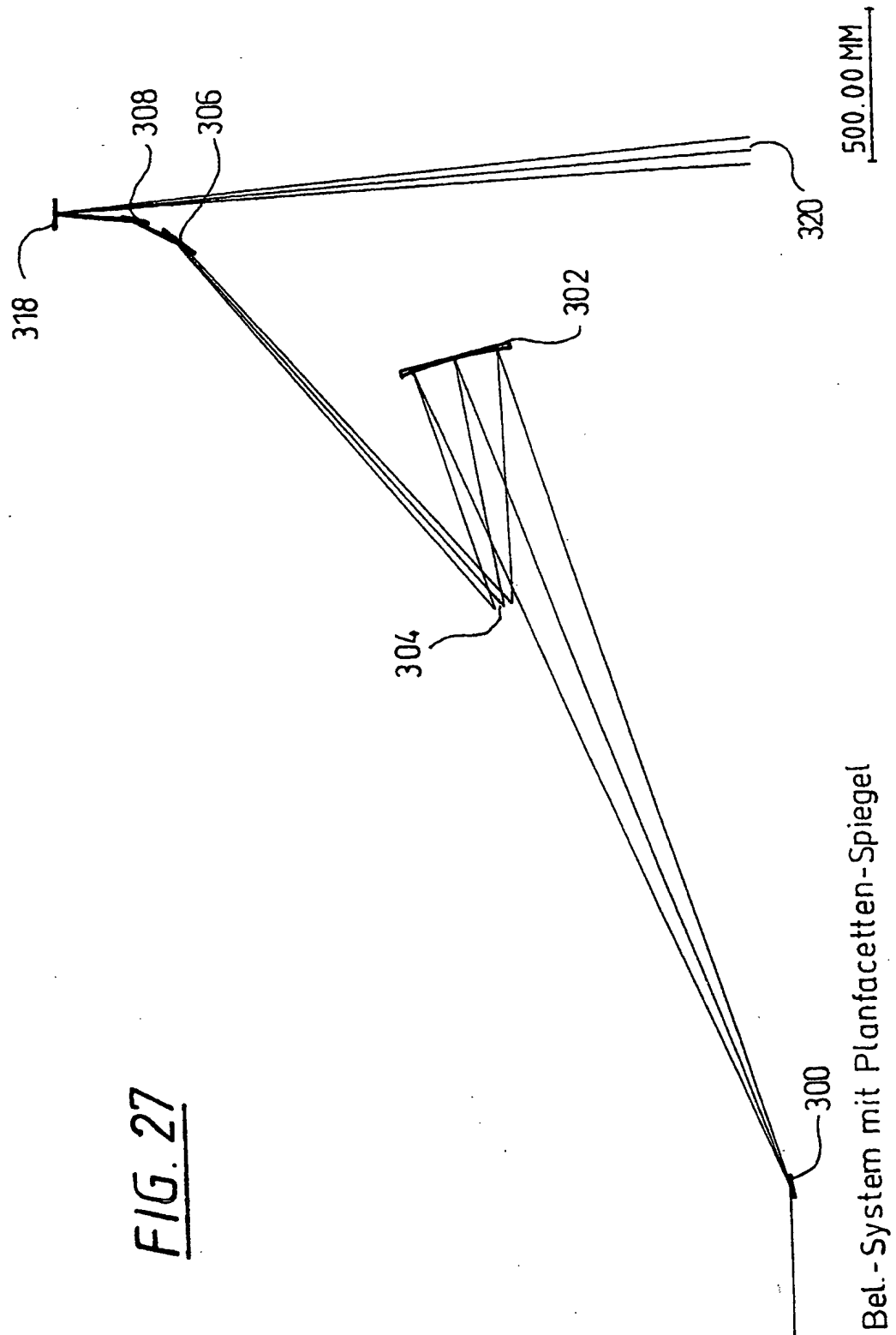


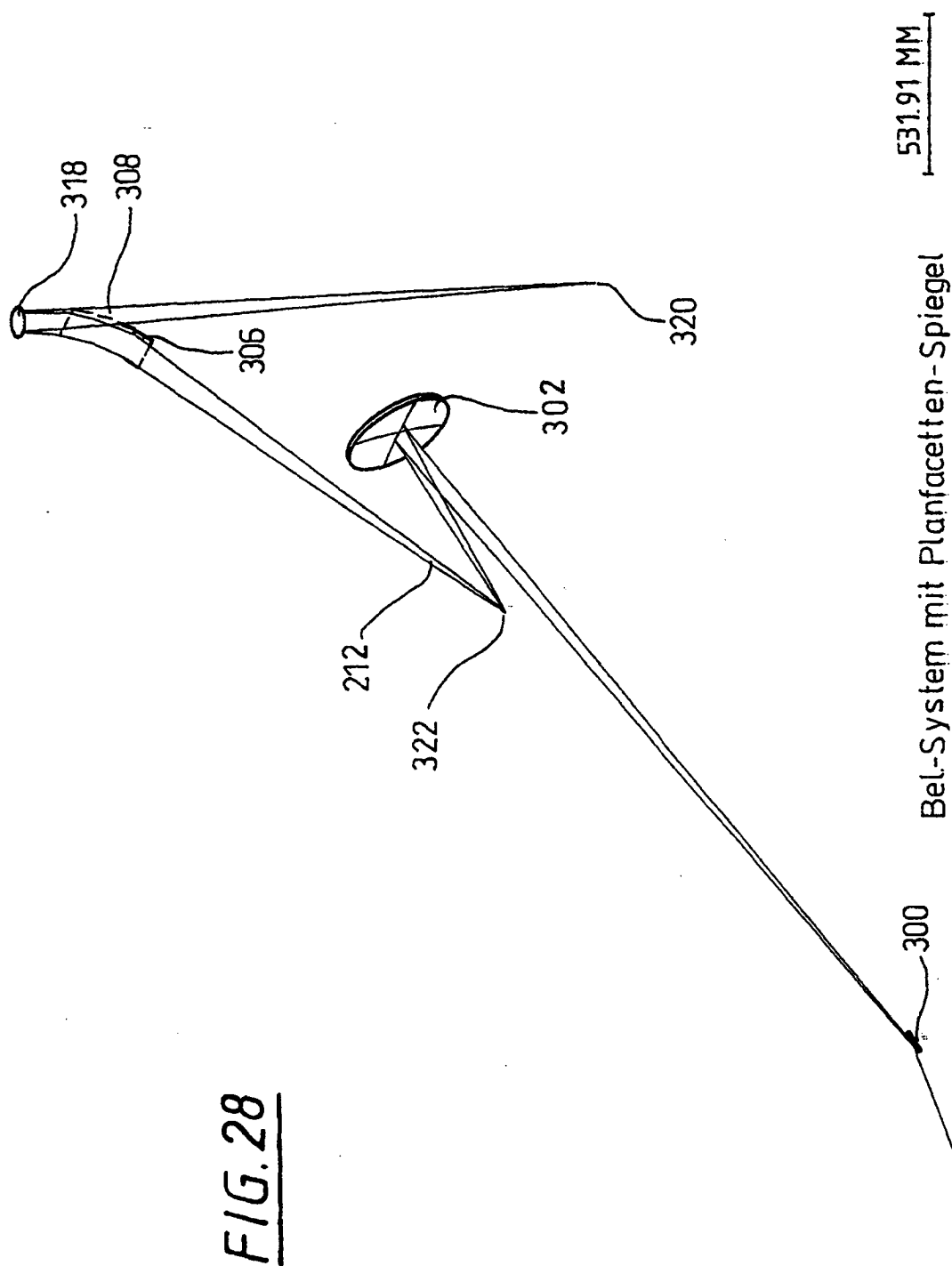
FIG. 26

1000.00 MM

Bel.-System mit Planfacetten-Spiegel







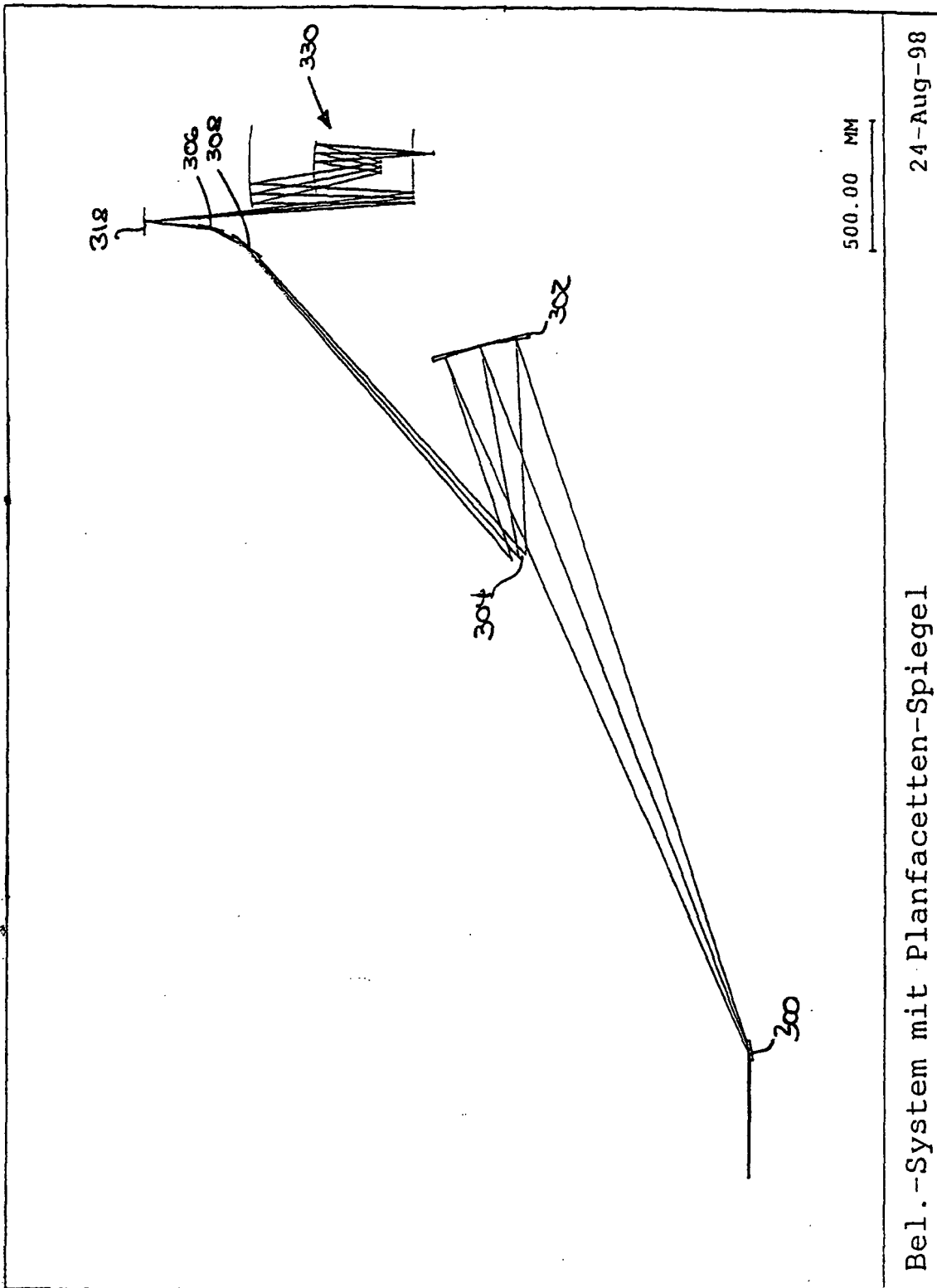


Fig. 29

Ausleuchtung des Retikelfeldes  
mit Planfacetten-Spiegel

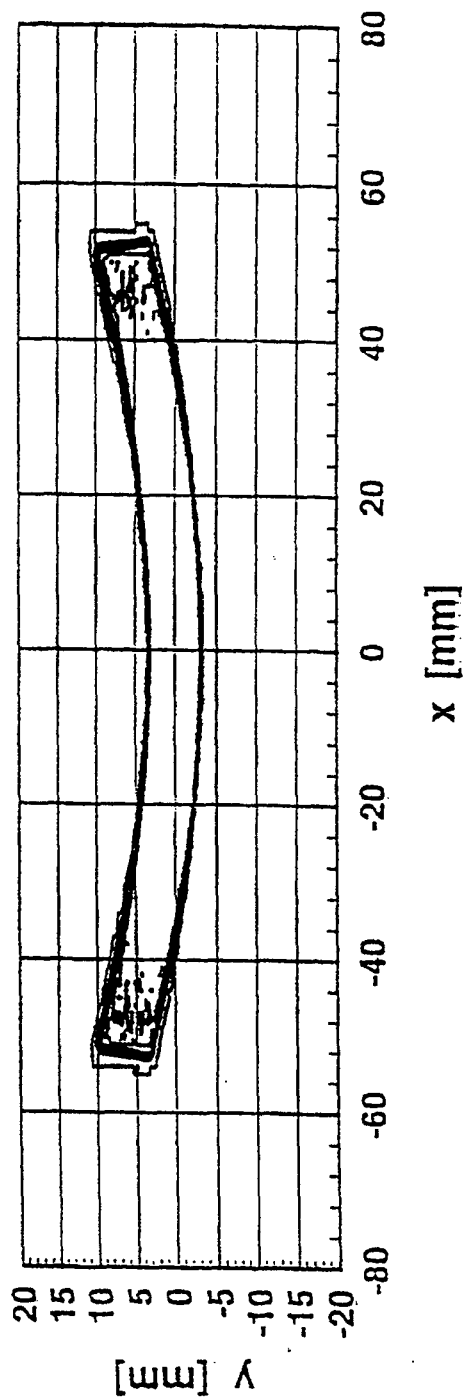


FIG. 30

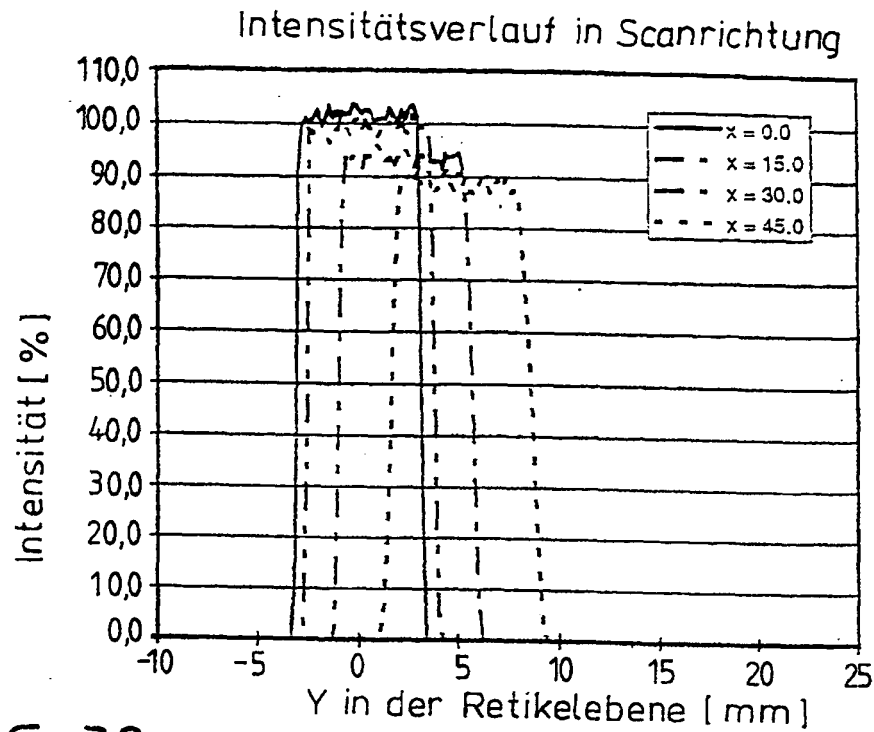
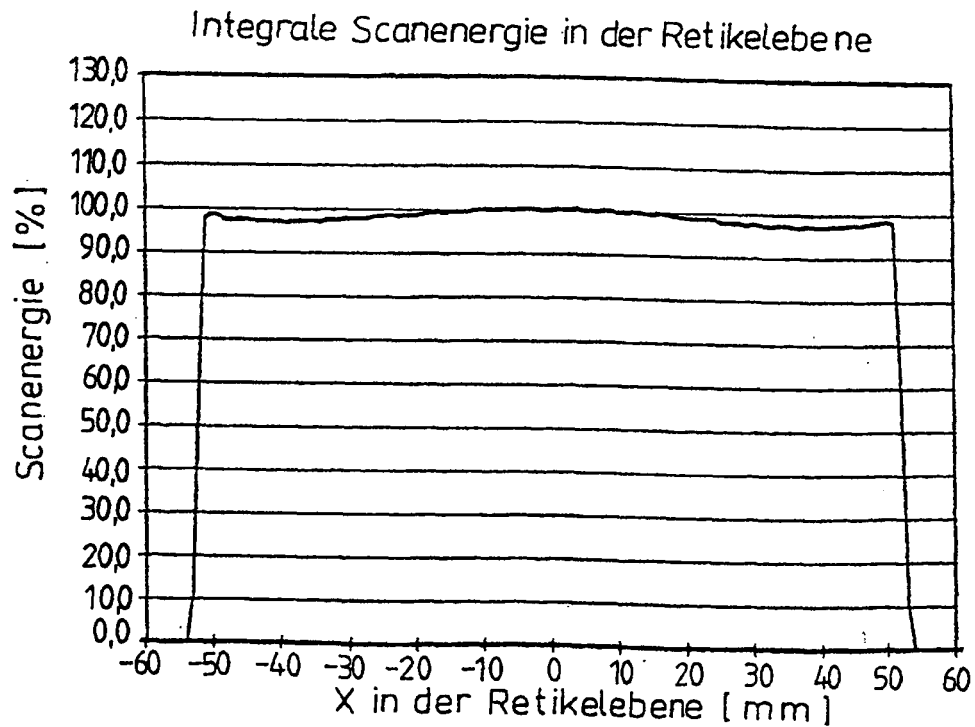
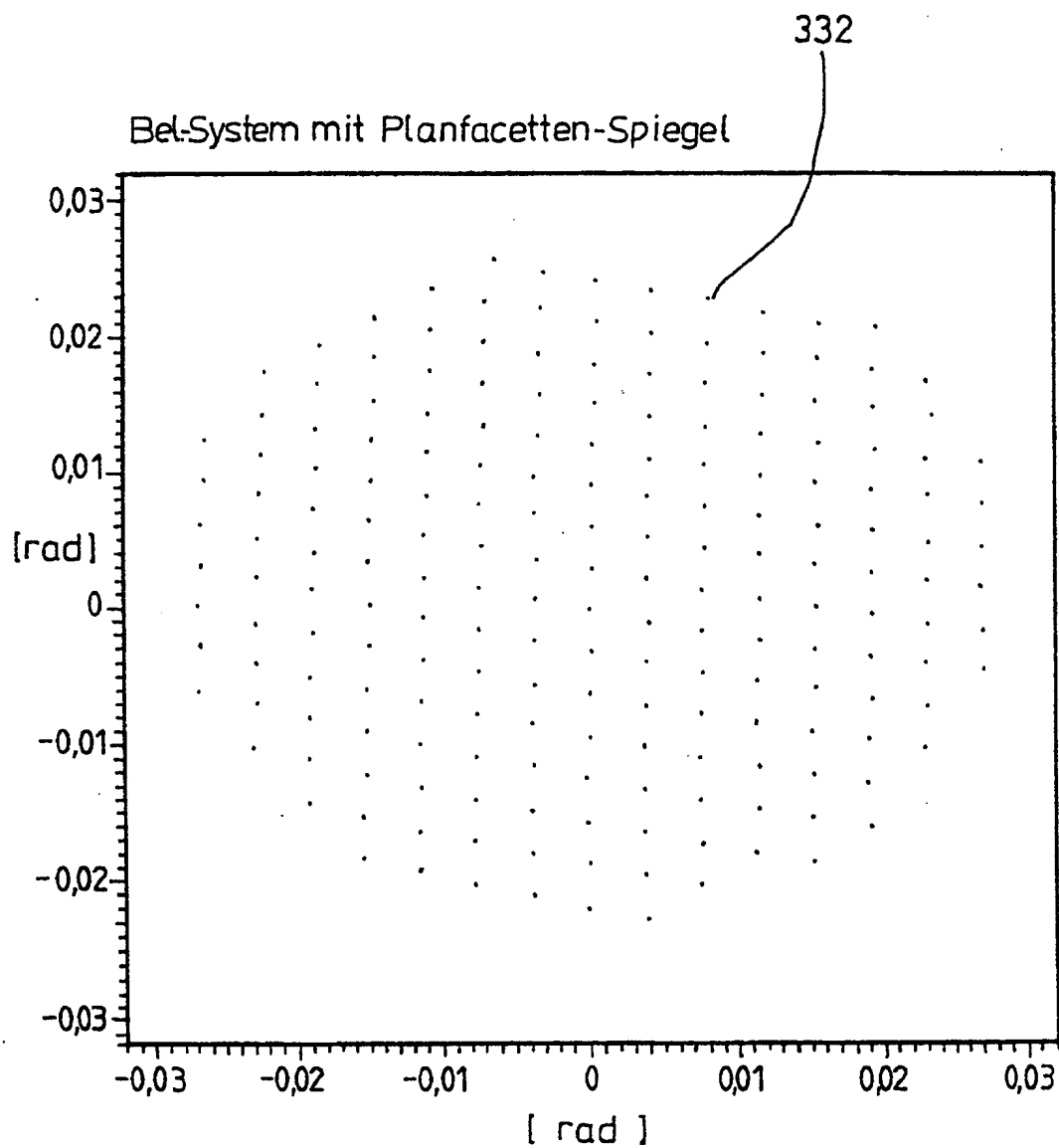
FIG. 31FIG. 32

FIG. 33

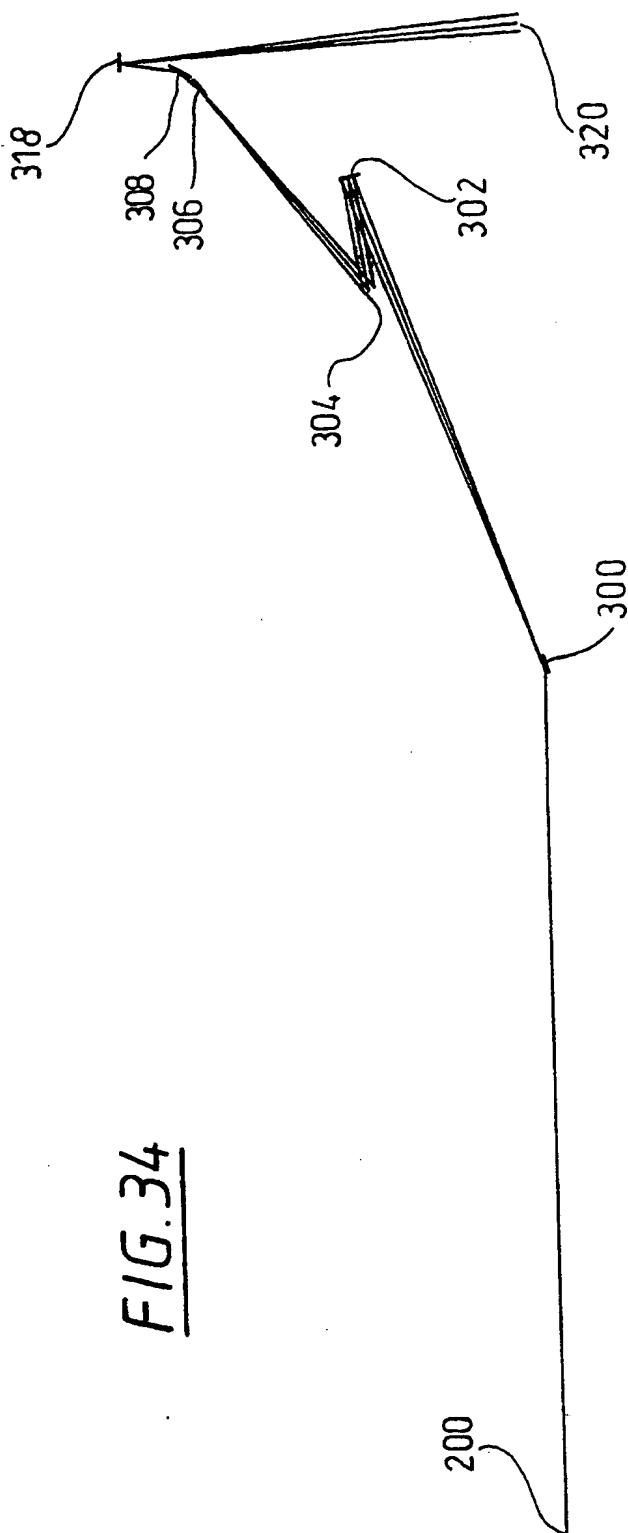
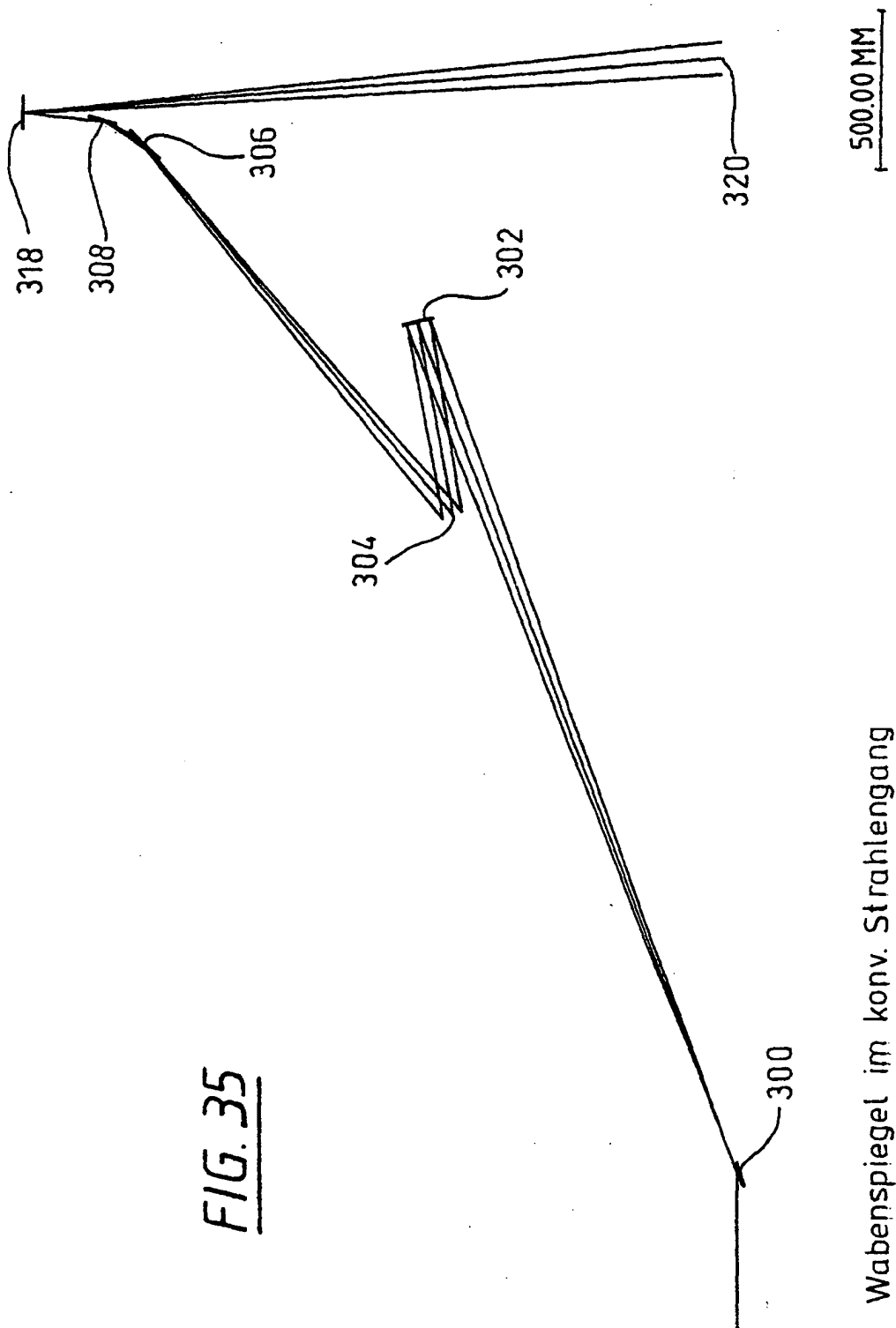
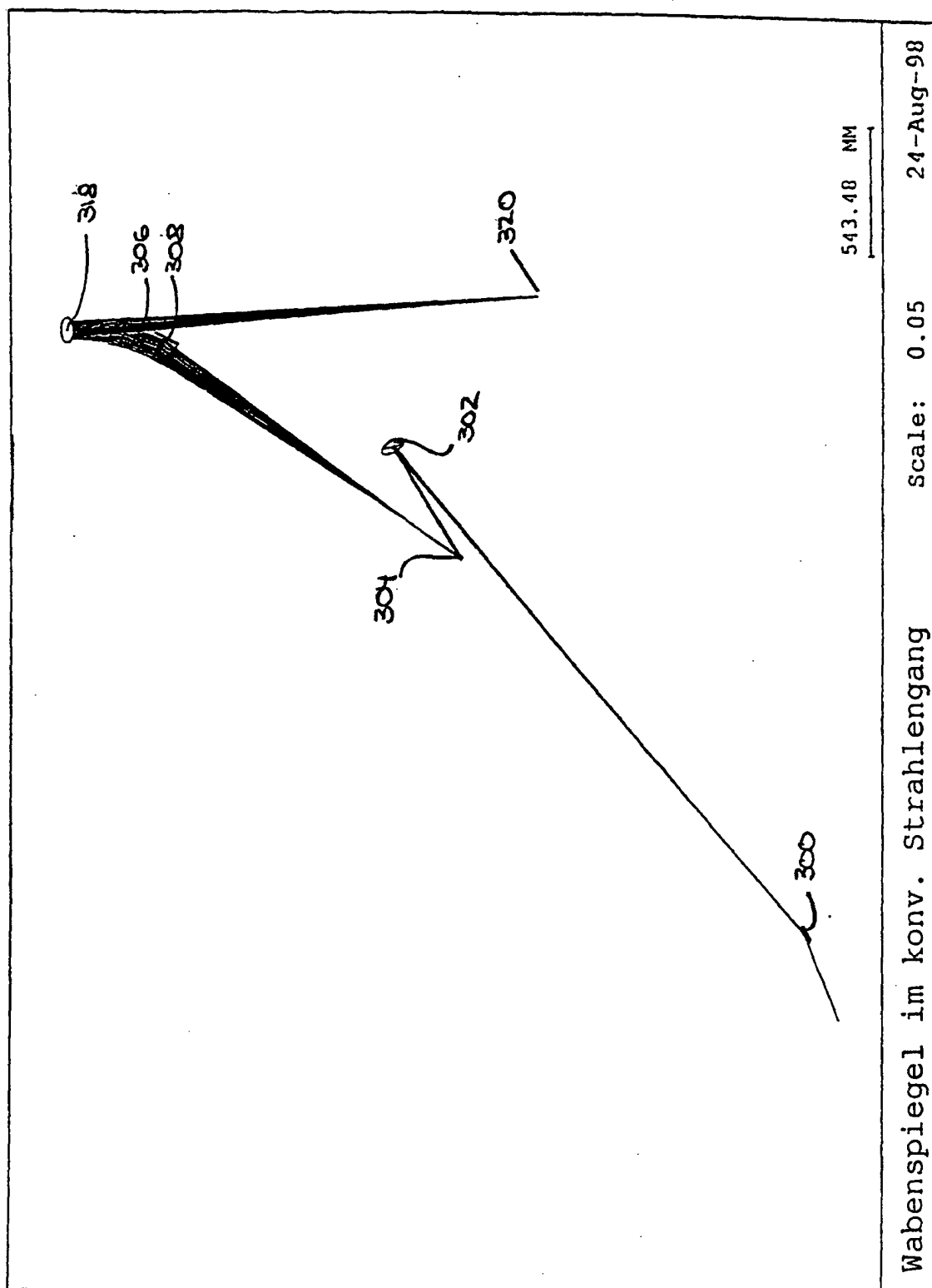


FIG. 34

Wabenspiegel im konv. Strahlengang







Fig

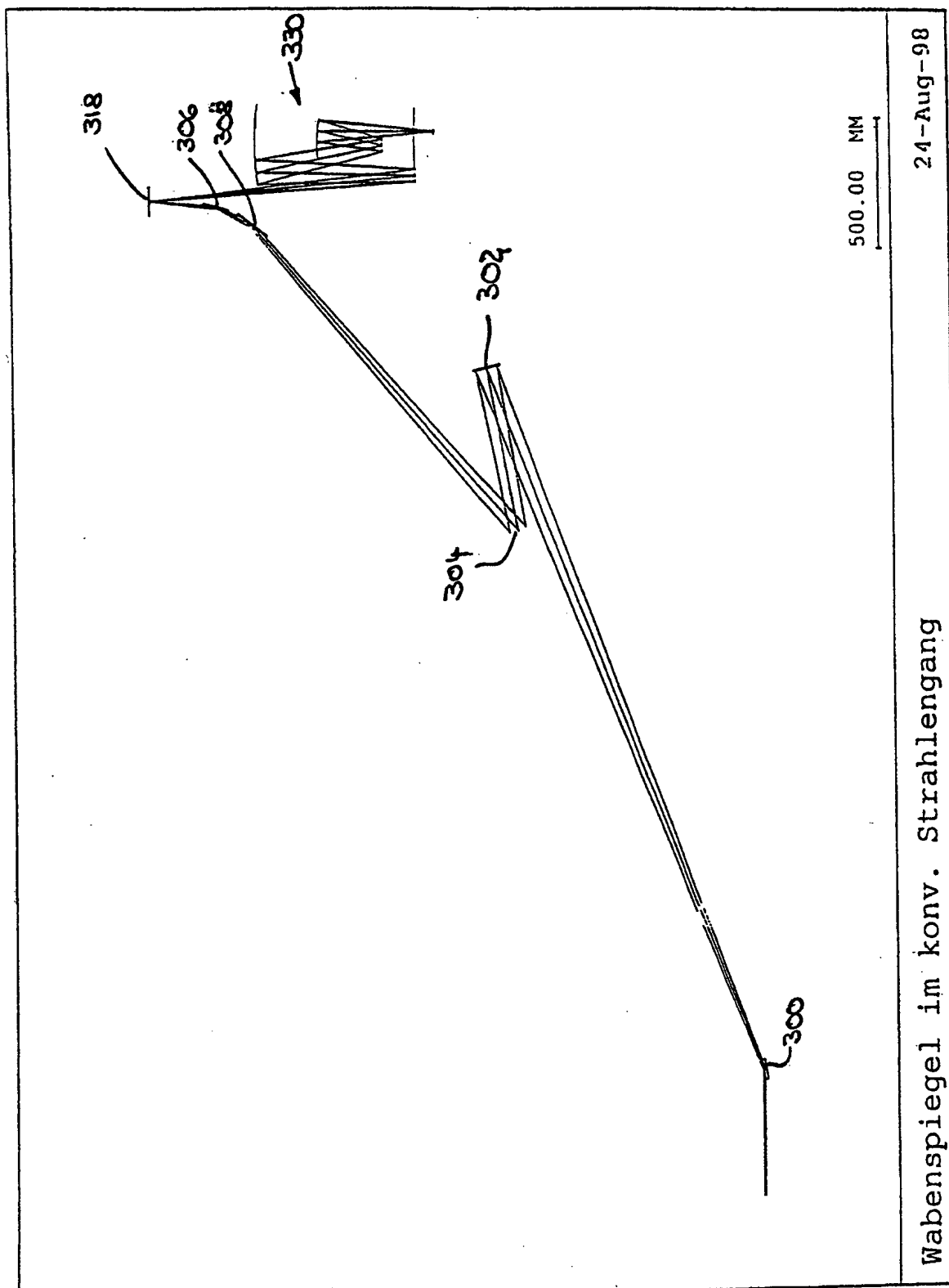


Fig. 37

Ausleuchtung des Retikelfeldes  
mit Wabenplatte im konvergenten Strahlengang

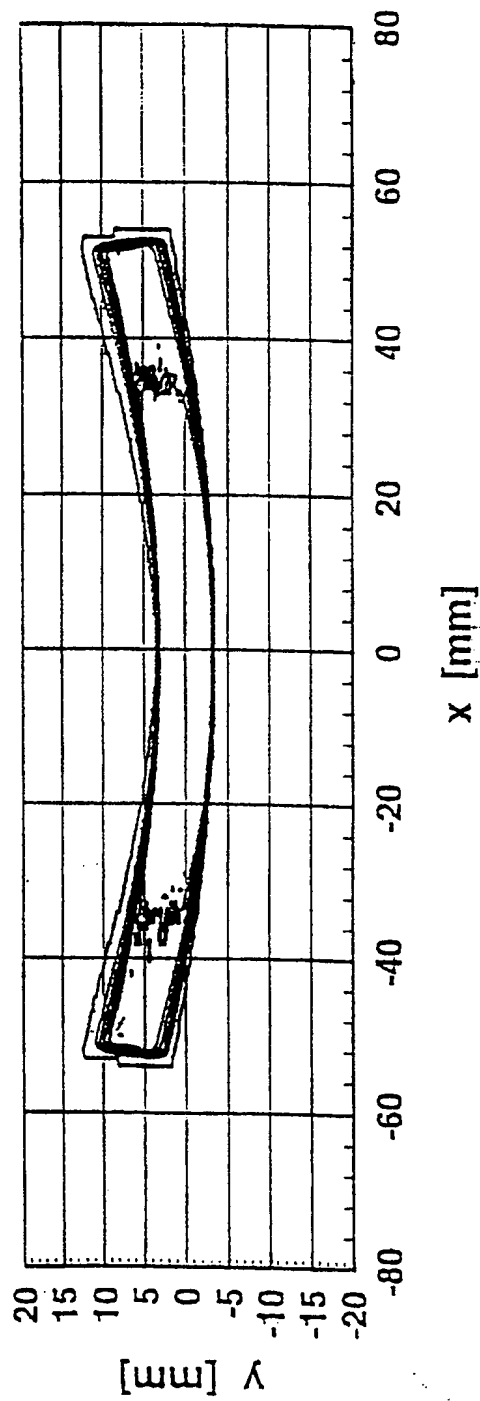
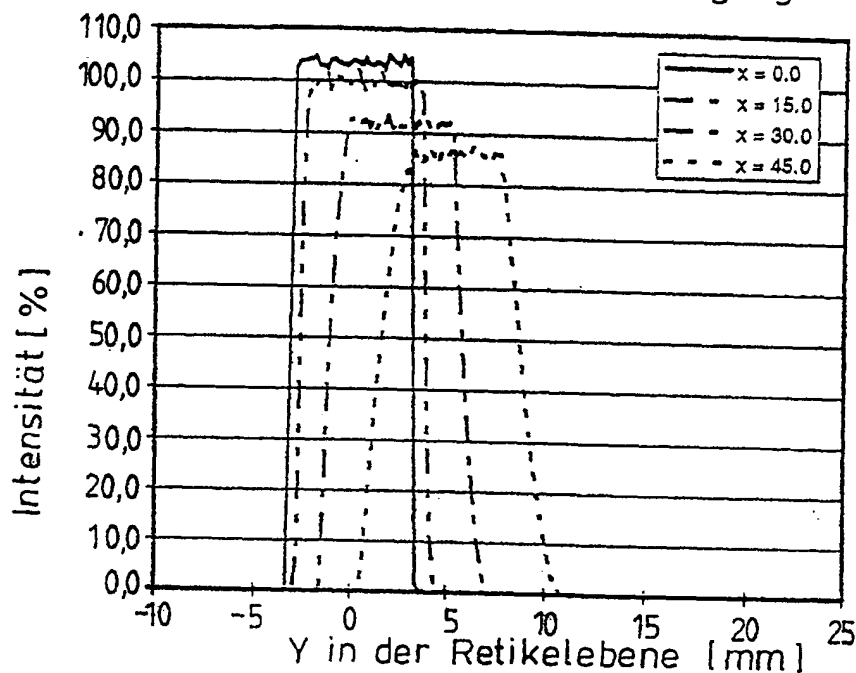


FIG. 38

**FIG. 39**

Intensitätsverlauf in Scanrichtung  
Refl. WaKo im konv. Strahlengang

**FIG. 40**

Integrale Scanenergie in der Retikelebene  
Refl. WaKo im konv. Strahlengang mit  
Feldlinse für 30°-Feld Undulator-Quelle

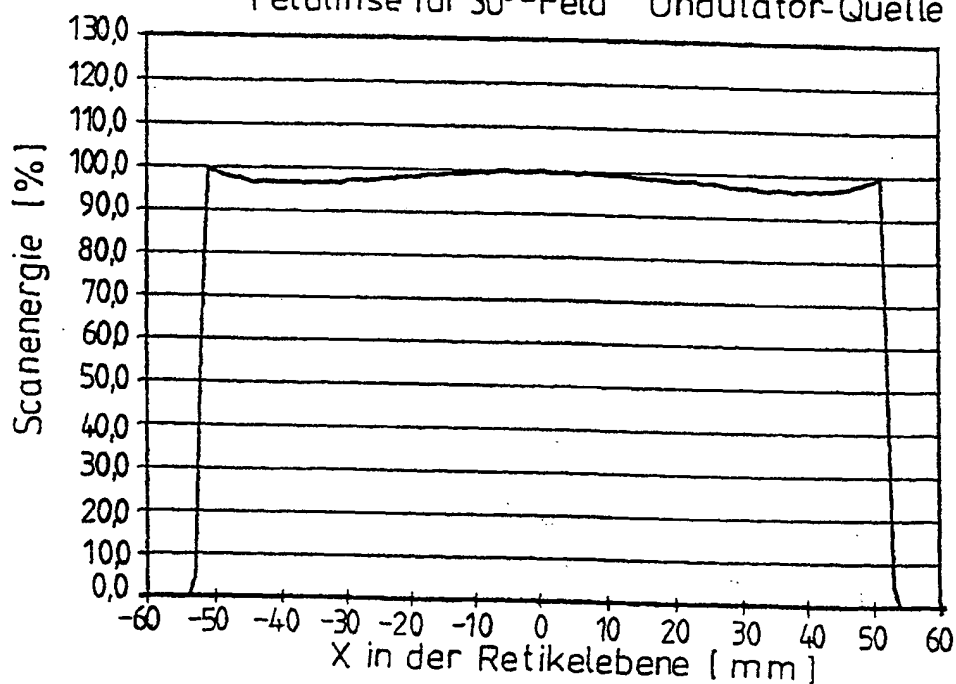


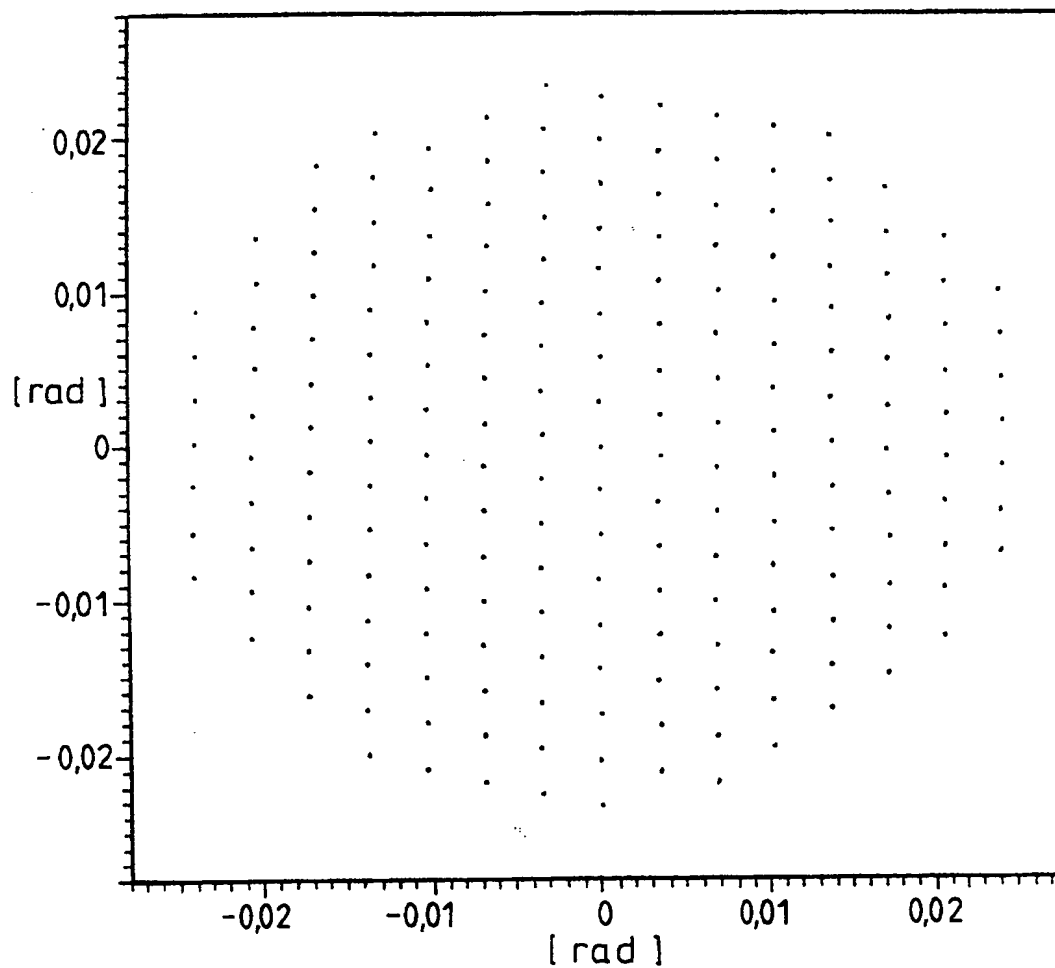
FIG. 41

FIG. 42

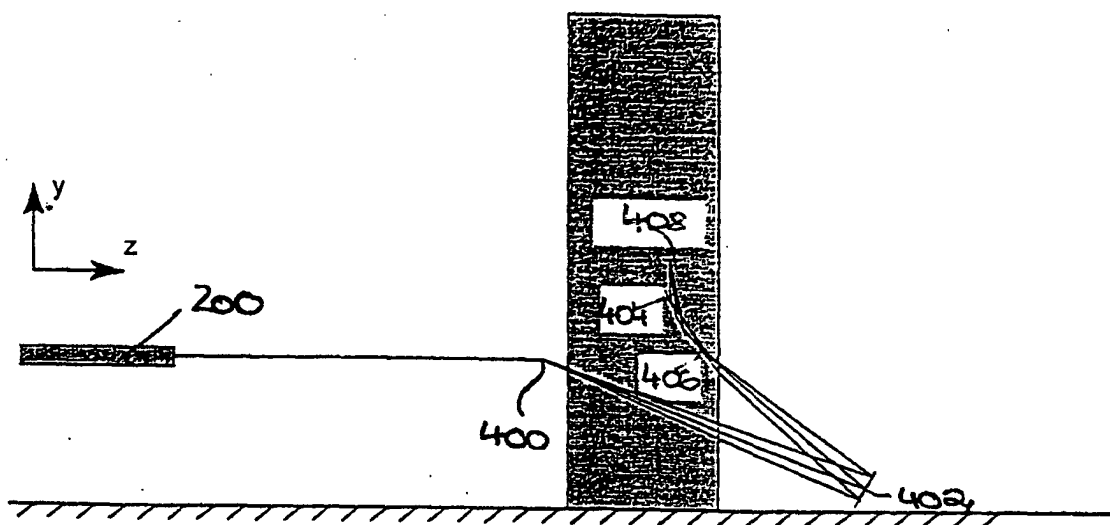
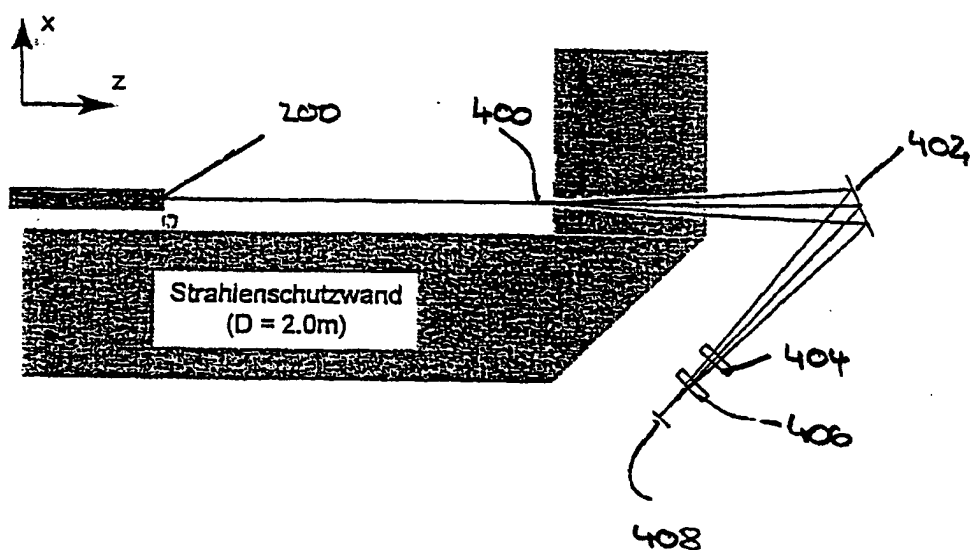
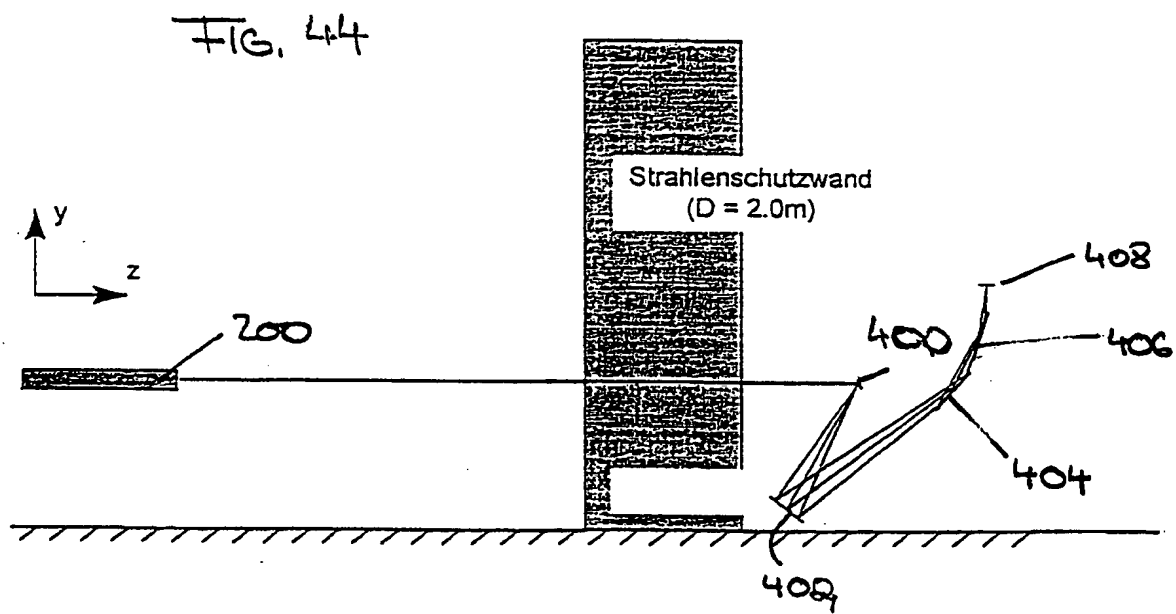
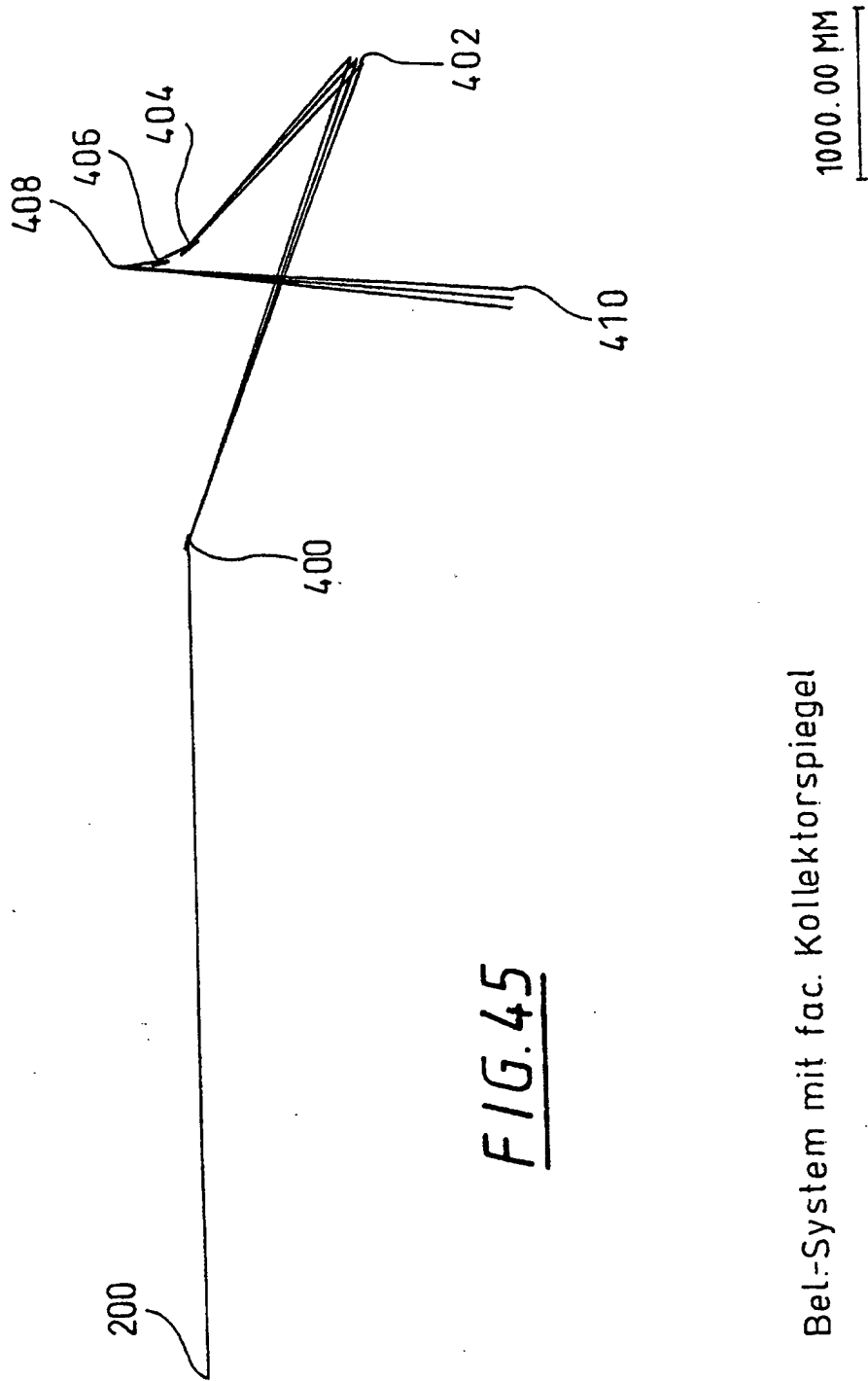


FIG. 43

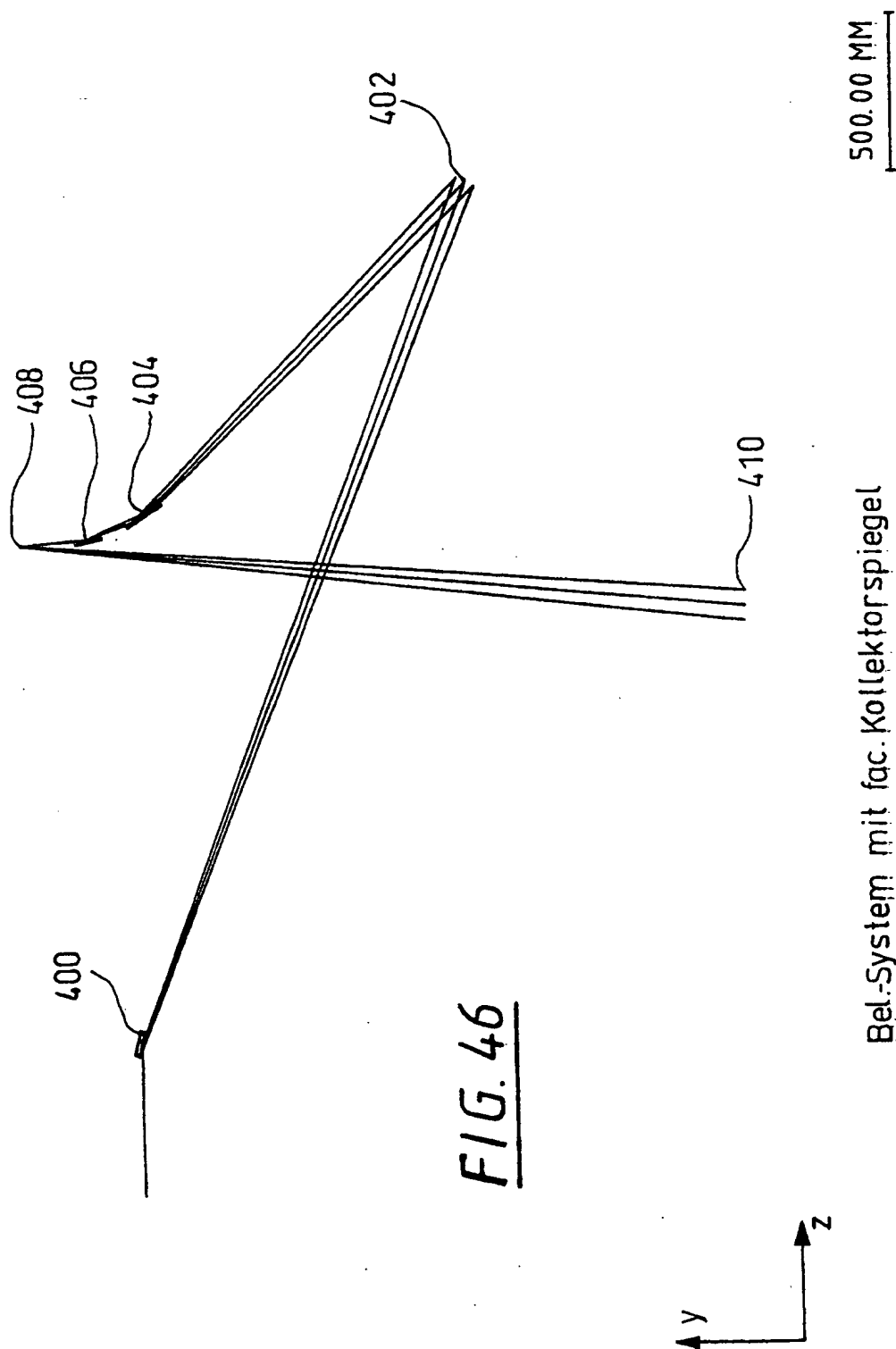


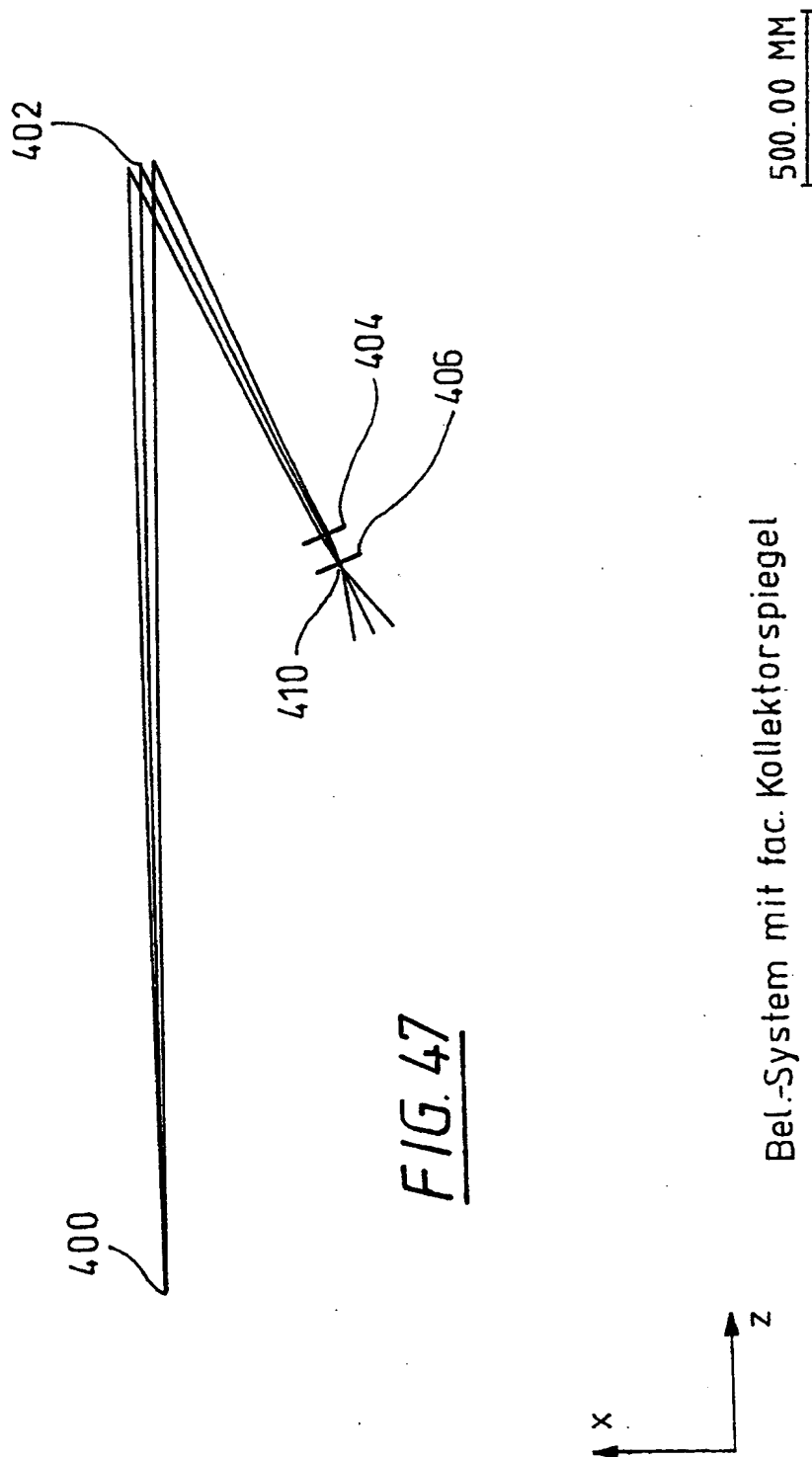


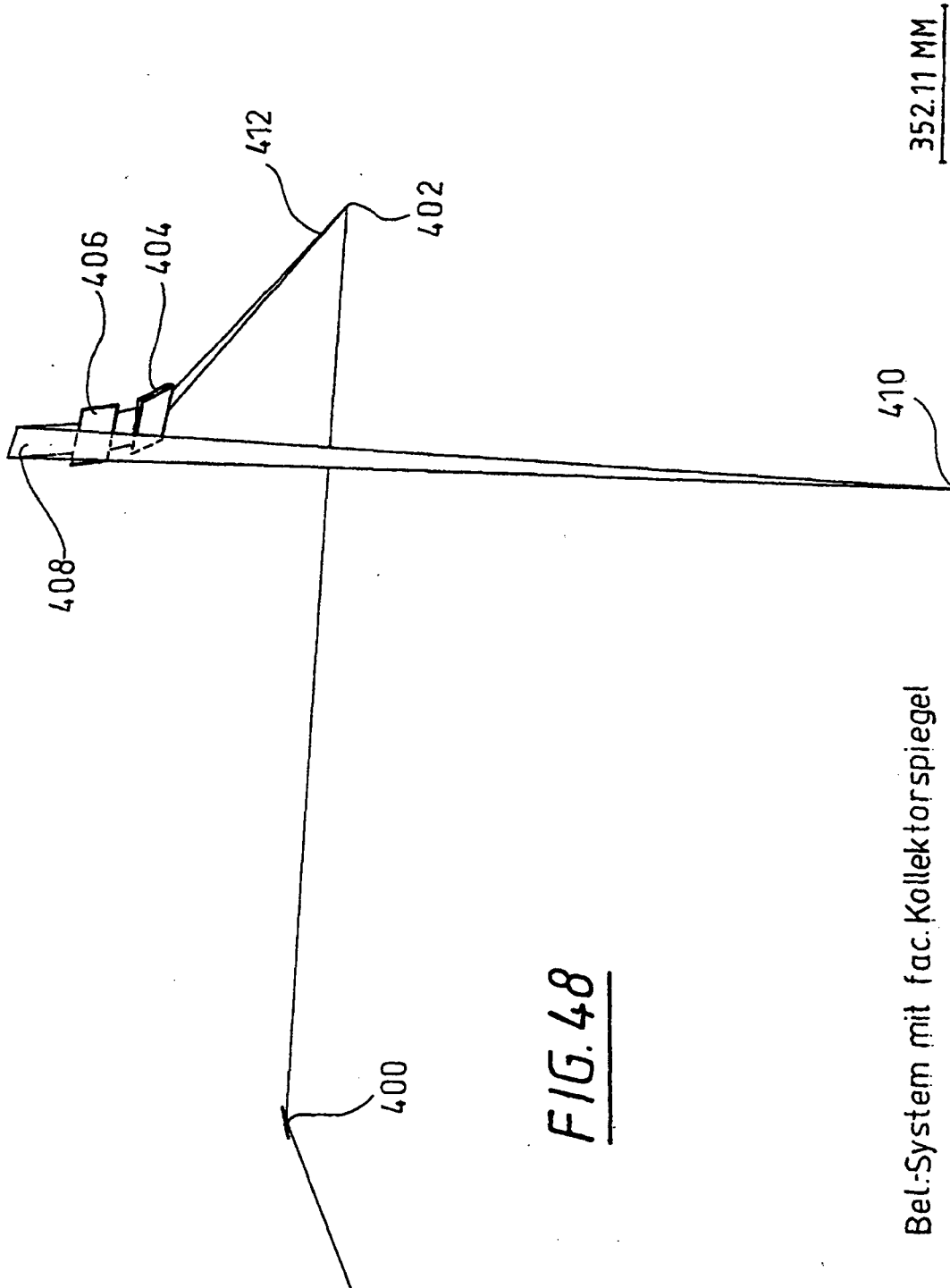


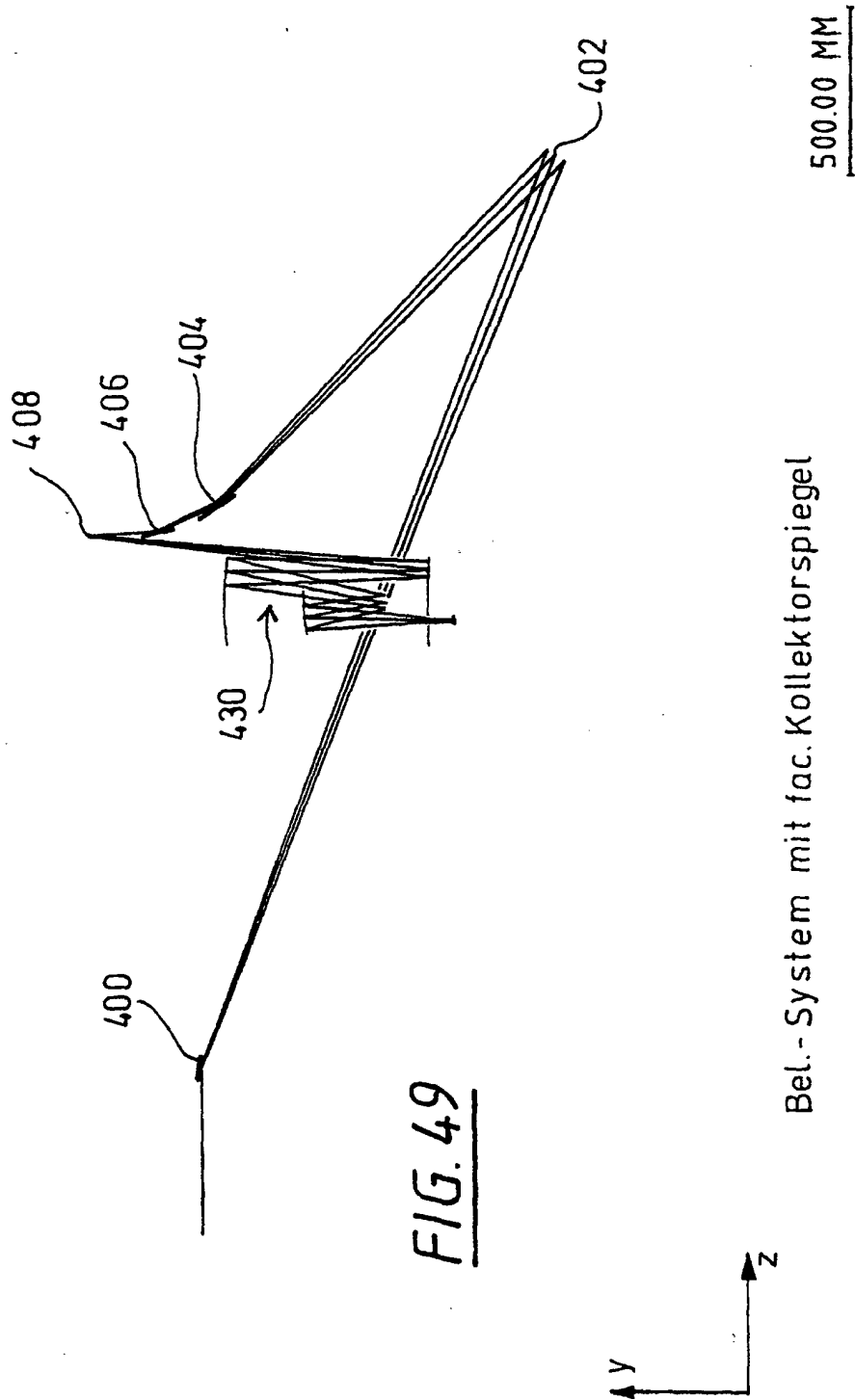
Bel.-System mit fac. Kollektorspiegel











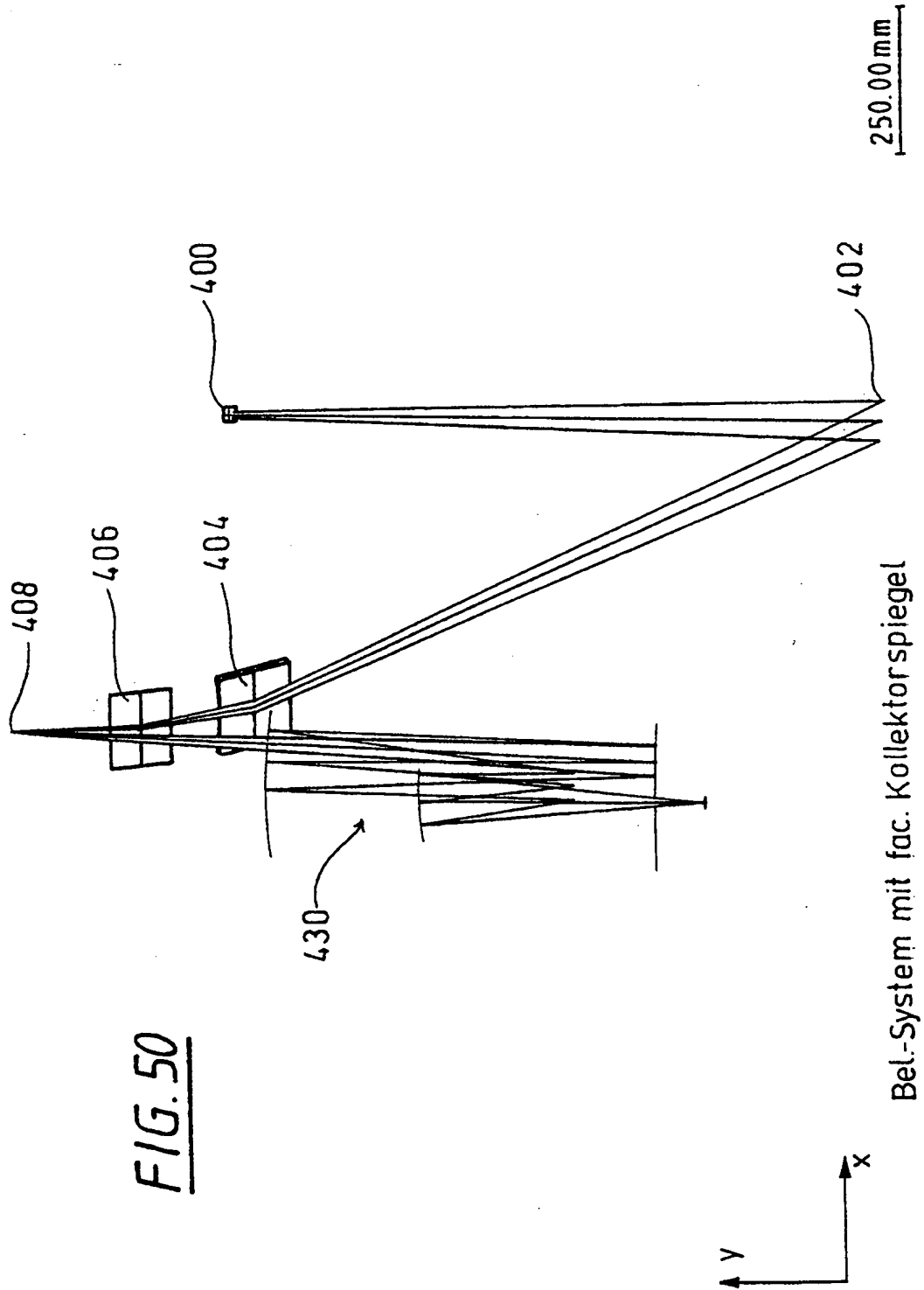
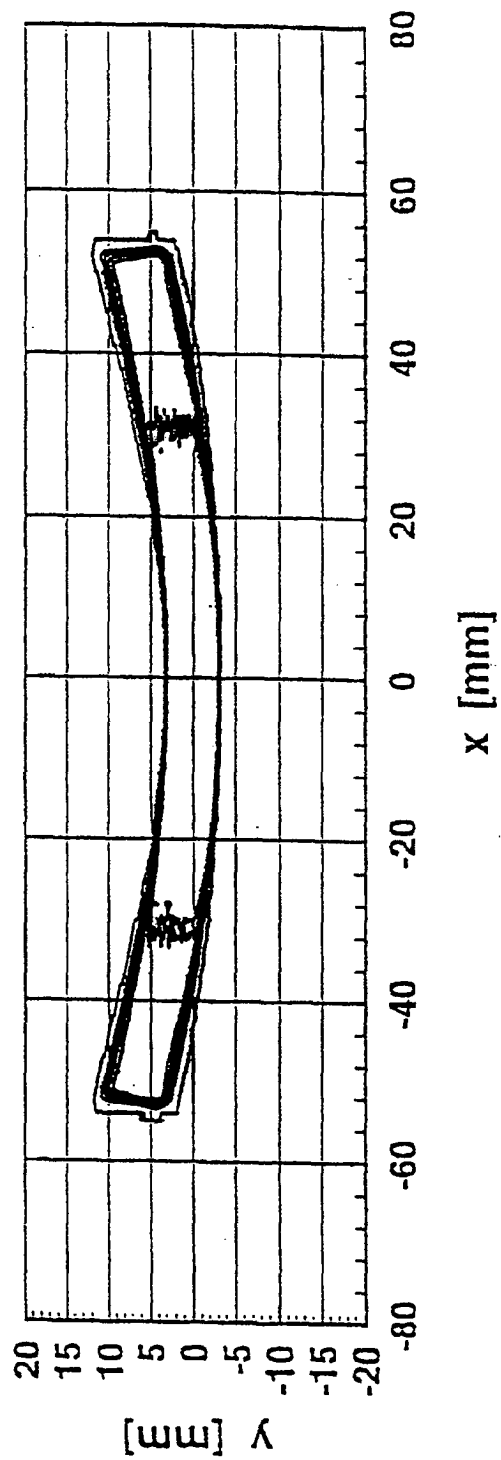
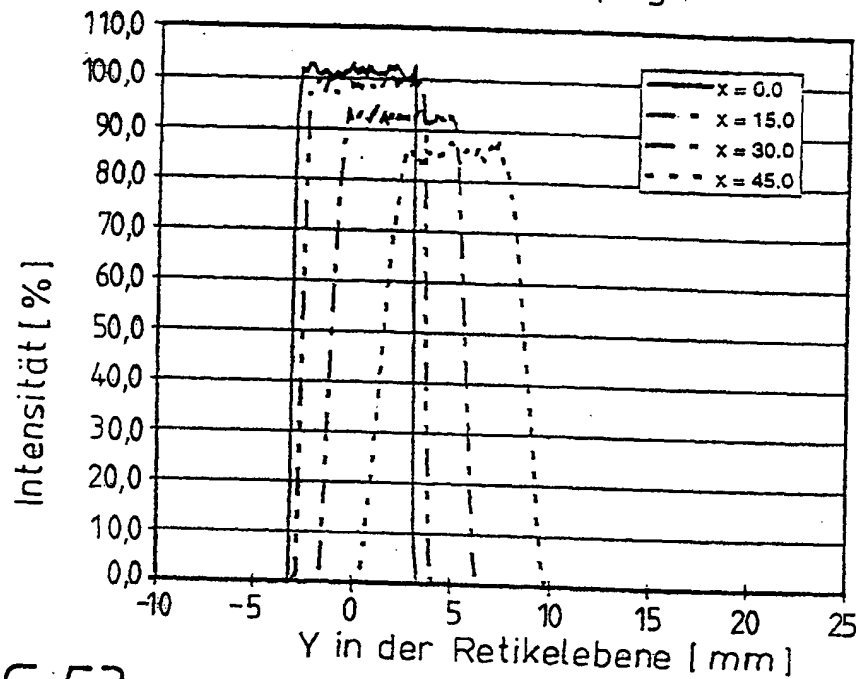


FIG. 51

Ausleuchtung des Retikelfeldes mit facettiertem Kollektor spiegel

**FIG. 52**

Intensitätsverlauf in Scanrichtung  
Facettierter Kollektorspiegel

**FIG. 53**

Integrale Scanenergie in der Retikelebene  
Facettierter Kollektorspiegel

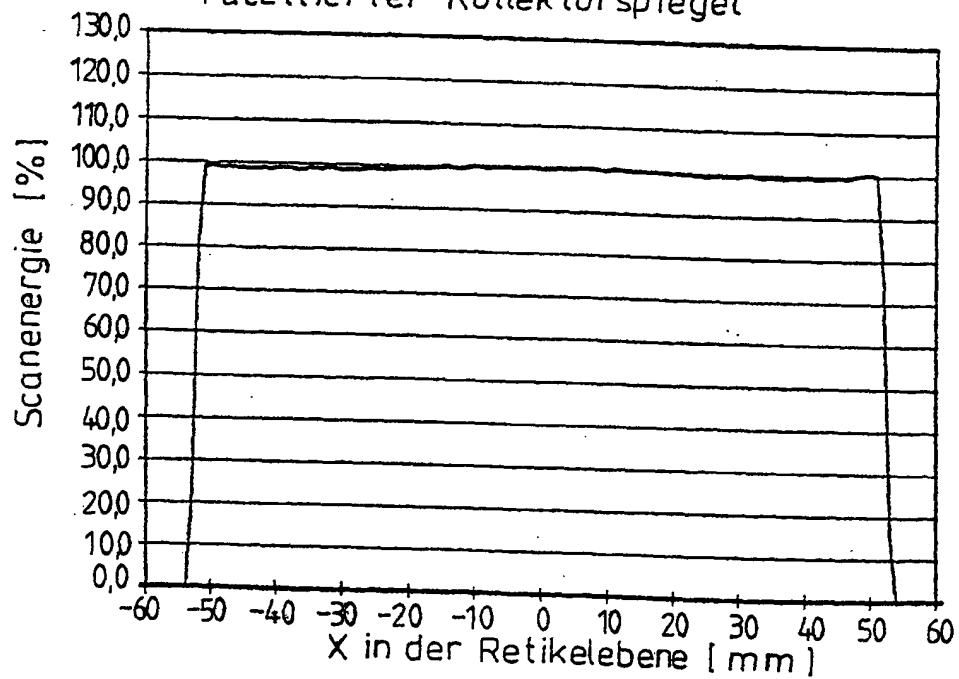
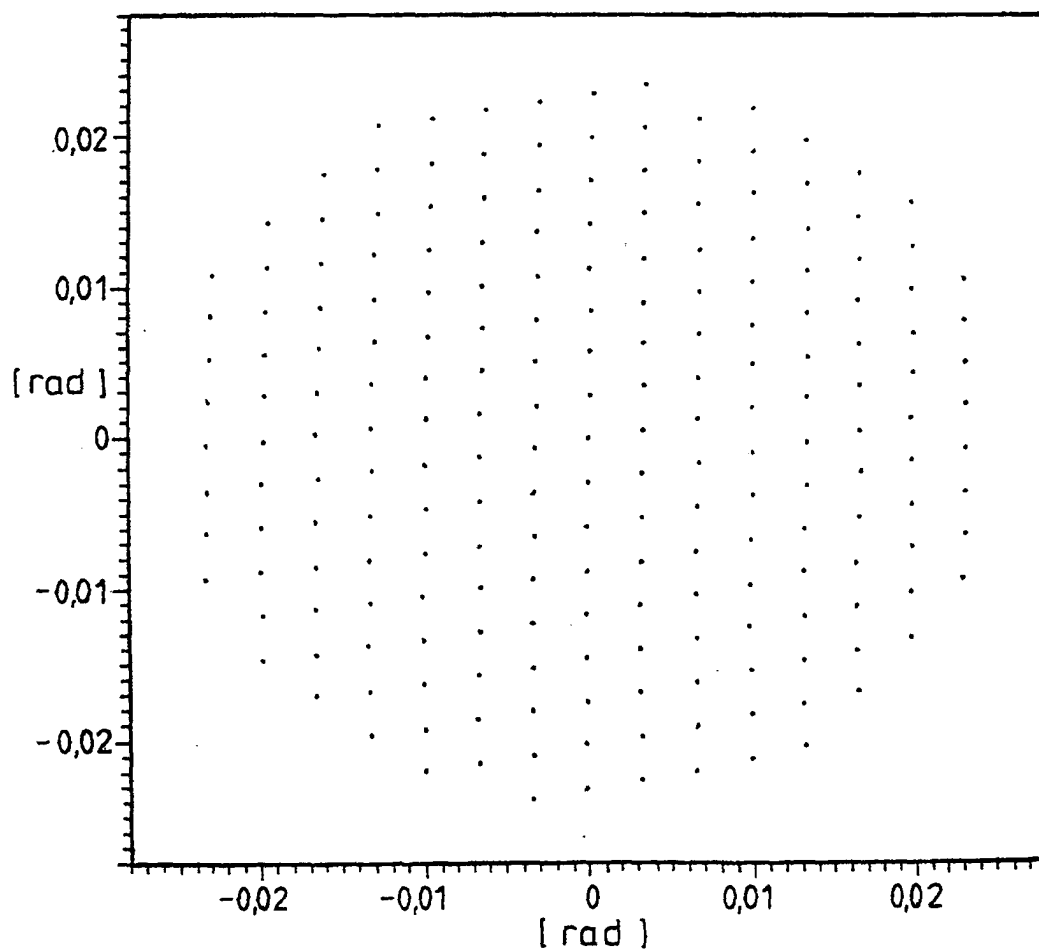
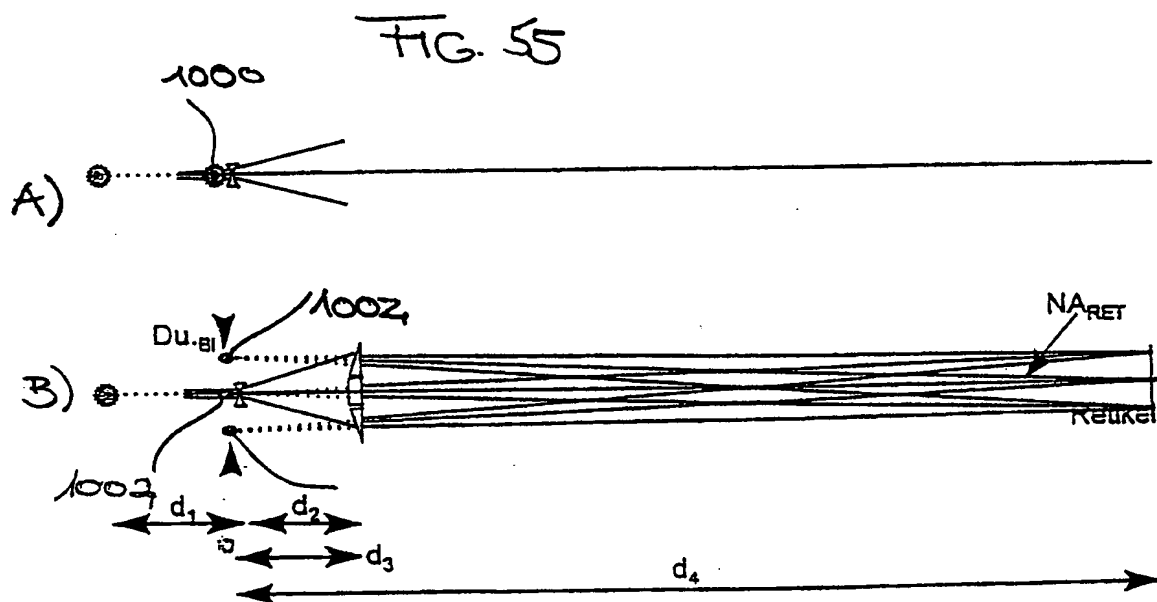


FIG. 54

Facettierter Kollektorspiegel: Pupillenausleuchtung f.(0,0)









# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 99/02999

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 581 605 A (MURAKAMI KATSUHIKO ET AL) 3 December 1996 (1996-12-03) cited in the application claim 8 ---	1
A	US 4 651 012 A (CLARK BENTON C ET AL) 17 March 1987 (1987-03-17) claims 1-27 ---	1
A	US 5 669 708 A (TANITSU OSAMU ET AL) 23 September 1997 (1997-09-23) claim 1 -----	1

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/EP 99/02999

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5339346 A	16-08-1994	CA 2121819 A,C EP 0626621 A JP 7169677 A	21-11-1994 30-11-1994 04-07-1995
US 5439781 A	08-08-1995	CA 2121608 A EP 0627667 A JP 6333798 A	11-11-1994 07-12-1994 02-12-1994
US 5737137 A	07-04-1998	NONE	
US 5581605 A	03-12-1996	JP 6235797 A JP 7084108 A JP 7094397 A JP 7249561 A US 5669708 A	23-08-1994 31-03-1995 07-04-1995 26-09-1995 23-09-1997
US 4651012 A	17-03-1987	NONE	
US 5669708 A	23-09-1997	JP 6235797 A JP 7084108 A JP 7094397 A JP 7249561 A US 5581605 A	23-08-1994 31-03-1995 07-04-1995 26-09-1995 03-12-1996

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 99/02999

**A. KLASSTIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES**  
IPK 6 G21K1/06

Nach der internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

**B. RECHERCHIERTE GEBIETE**

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 6 G21K

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

**C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN**

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 339 346 A (WHITE DONALD L) 16. August 1994 (1994-08-16) in der Anmeldung erwähnt Ansprüche 1-17	1,65,71
A	US 5 439 781 A (WHITE DONALD L ET AL) 8. August 1995 (1995-08-08) in der Anmeldung erwähnt Ansprüche 1-17	1,71
A	US 5 737 137 A (COHEN SIMON J ET AL) 7. April 1998 (1998-04-07) in der Anmeldung erwähnt Ansprüche 1-11	1,65
	--- -/-	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- \* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
  - "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
  - "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
  - "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
  - "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

2. September 1999

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

08/09/1999

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Van den Bulcke, E

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 99/02999

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 581 605 A (MURAKAMI KATSUHIKO ET AL) 3. Dezember 1996 (1996-12-03) in der Anmeldung erwähnt Anspruch 8 -----	1
A	US 4 651 012 A (CLARK BENTON C ET AL) 17. März 1987 (1987-03-17) Ansprüche 1-27 -----	1
A	US 5 669 708 A (TANITSU OSAMU ET AL) 23. September 1997 (1997-09-23) Anspruch 1 -----	1

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 99/02999

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5339346	A	16-08-1994	CA	2121819 A,C	21-11-1994
			EP	0626621 A	30-11-1994
			JP	7169677 A	04-07-1995
US 5439781	A	08-08-1995	CA	2121608 A	11-11-1994
			EP	0627667 A	07-12-1994
			JP	6333798 A	02-12-1994
US 5737137	A	07-04-1998	KEINE		
US 5581605	A	03-12-1996	JP	6235797 A	23-08-1994
			JP	7084108 A	31-03-1995
			JP	7094397 A	07-04-1995
			JP	7249561 A	26-09-1995
			US	5669708 A	23-09-1997
US 4651012	A	17-03-1987	KEINE		
US 5669708	A	23-09-1997	JP	6235797 A	23-08-1994
			JP	7084108 A	31-03-1995
			JP	7094397 A	07-04-1995
			JP	7249561 A	26-09-1995
			US	5581605 A	03-12-1996

